

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
 ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Юргинский технологический институт
 Направление подготовки: 280700 Техносферная безопасность
 Профиль: Защита в чрезвычайных ситуациях
 Кафедра безопасности жизнедеятельности, экологии и физического воспитания

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Разработка технологии определения остаточного ресурса методом акустической тензометрии для снижения аварийных рисков на трубопроводном транспорте

УДК 614.8:621.643

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-17Г11	Осинская Елена Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. БЖДЭиФВ	Солодский С.А.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭиАСУ	Нестерук Д.Н.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. БЖДЭиФВ	Луговцова Н.Ю.			

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер каф. БЖДЭиФВ	Романенко В.О.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
БЖДЭиФВ	Солодский С.А.	к.т.н.		

Юрга – 2016 г.

**Планируемые результаты обучения по основной образовательной программе
направления 280700 – Техносферная безопасность**

Код результатов	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P1	Применять базовые и специальные естественнонаучные и математические знания, достаточные для комплексной инженерной деятельности в области техносферной безопасности.
P2	Применять базовые и специальные знания в области техносферной безопасности для решения инженерных задач.
P3	Ставить и решать задачи комплексного анализа, связанные с организацией защиты человека и природной среды от опасностей техногенного и природного характера, с использованием базовых и специальных знаний, современных аналитических методов и моделей, осуществлять надзорные и контрольные функции в сфере техносферной безопасности.
P4	Проводить теоретические и экспериментальные исследования, включающие поиск и изучение необходимой научно-технической информации, математическое моделирование, проведение эксперимента, анализ и интерпретацию полученных данных, на этой основе разрабатывать технику и технологии защиты человека и природной среды от опасностей техногенного и природного характера в соответствии с техническим заданием и с использованием средств автоматизации проектирования.
P5	Использовать знание организационных основ безопасности различных производственных процессов, знания по охране труда и охране окружающей среды для успешного решения задач обеспечения техносферной безопасности.
P6	Обоснованно выбирать, внедрять, монтировать, эксплуатировать и обслуживать современные системы и методы защиты человека и природной среды от опасностей, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья, безопасности труда, выполнять требования по защите окружающей среды.
Универсальные компетенции	
P7	Использовать базовые и специальные знания в области проектного менеджмента для ведения комплексной инженерной деятельности.
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты комплексной инженерной деятельности.
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.
P10	Демонстрировать знания правовых, социальных, экономических и культурных аспектов комплексной инженерной деятельности.
P11	Демонстрировать способность к самостоятельной работе и к самостоятельному обучению в течение всей жизни и непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии.

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
 ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Юргинский технологический институт
 Направление подготовки: 280700 Техносферная безопасность
 Профиль: Защита в чрезвычайных ситуациях
 Кафедра безопасности жизнедеятельности, экологии и физического воспитания

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. кафедрой БЖДЭиФВ
 _____ С.А. Солодский
 «__» _____ 2016 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме

Бакалаврской работы	
---------------------	--

Студенту:

Группа	ФИО
3-17Г11	Осинской Елене Сергеевне

Тема работы:

Разработка технологии определения остаточного ресурса методом акустической тензометрии для снижения аварийных рисков на трубопроводном транспорте	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	29.01.2016 г. № 26/с

Срок сдачи студентами выполненной работы:	14.06.2016 г.
---	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	1 Объект исследования – трубопроводный транспорт водоснабжения города Юрги. 2 Краткая характеристика ООО «ЮргаВодтранс». 3 Исходные данные о потенциальной опасности территории. 4 Документация и нормативные документы по диагностике и ремонту трубопроводного транспорта.
Перечень подлежащих исследованию, проекти-	1 Системы водоснабжения города. 2 Существующие системы оценки ресурса

рованию и разработке вопросов	действующих трубопроводов водоснабжения. 3 Разработка технологии оценки остаточного ресурса трубопроводов тепловой энергии, основанный на измерении осевых и окружных механических напряжений 1-го рода, возникающих в результате технологических воздействий, в условиях упругой деформации.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Нестерук Дмитрий Николаевич
Социальная ответственность	Луговцова Наталья Юрьевна
Нормоконтроль	Романенко Василий Олегович

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.02.2016 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. БЖДЭиФВ	Солодский С.А.	к.т.н.		10.02.2016

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-17Г11	Осинская Елена Сергеевна		10.02.2016

Реферат

Выпускная квалификационная работа: ____ с., ____ таблицы; ____ рисунков; ____ источников; ____ приложения.

Ключевые слова: АКУСТОУПРУГОСТЬ, МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯ, МЕТОД НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ, УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНА.

Объектом исследования является металлоконструкция исследуемая методом акустоупругости.

Цель работы – оценка НДС сварной металлоконструкции.

В настоящей выпускной квалификационной работе на основе теоретического и экспериментального анализа существующих методов определения НДС было выявлено перспективность метода акустоупругости.

Рассмотрена сущность метода акустоупругости.

Экспериментально исследованы напряжения в металлоконструкциях методом акустоупругости.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word и в графическом редакторе АСКОН (Компас – 3D – V10) представлена на CD-диске (в конверте на обороте обложки).

The abstract

Graduation thesis: ____ pages., ____ tables, ____ drawings, ____ sources, ____ applications.

Key words: ACOUSTOELASTIC, MECHANICAL STRESS, METALWORK, METHOD OF STRESS-STRAIN STATE, ULTRASOUND WAVE.

Object of study is a metalwork under investigation by the acoustoelastic method.

The work purpose – an estimation of a welded metalwork stress strain behavior.

In the present final qualifying work on the basis of the theoretical and experimental analysis of existing methods of definition of stress strain behavior it has been revealed perspective of the acoustoelastic method.

The essence of the acoustoelastic method was considered. Experimentally studied the stress in metalwork using the acoustoelastic method.

Final qualifying work is executed in text editor Microsoft Word and in graphic editor ACKOH (the Compass – 3D – V10) is presented on CD-disk (in an envelope on the back of a cover).

Введение

В современной промышленности, более 50 % изношенных оборудования и конструкций, и вопросы безопасности должны быть решены немедленно.

Одним из основных направлений деятельности в этом направлении осуществляется надежной и своевременной экспертизой промышленной безопасности технических устройств и сооружений, которая включает в себя определение технического состояния конструкционных материалов с использованием неразрушающих испытаний. Так как конструкции, как его использование в металлических и других материалах, генерируемое напряжение из-за усталости, которые несут к образованию трещин, деформации и т.п.

Существует множество способов неразрушающих методов контроля, таких как: ультразвуковой, магнитопорошковый, радиографический, вихретоковый, капиллярный, акустико-эмиссионный и др. Но не все из вышеперечисленных методов контроля могут своевременно определить момент зарождения дефекта и рассчитать дальнейший оставшийся срок службы. И только ультразвуковой контроль методом акустоупругости способен определить предаварийное состояние материала конструкции еще заранее до появления дефекта, что позволяет заранее произвести ремонт аварийно опасного участка, тем самым предотвратив аварию, защитив жизни людей, и снизить денежные затраты. Так как дешевле заранее отремонтировать один аварийный участок всей промышленной конструкции, чем восстанавливать всю конструкцию. В данной дипломной работе будут рассмотрены: напряженно-деформированное состояние материала, способы контроля, изучение метода ультразвуковой акустоупругости, и проведены экспериментальные исследования.

1 Обзор литературы

Сегодня применяют, стандартные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, магнитопорошковый, радиографический, вихретоковый, капиллярный, акустико-эмиссионный и др), чтобы исправить существующий материальный ущерб: трещины, разрывы, неполное слияние, поры, свищи, определить их расположение и размер. Вышеуказанные методы неразрушающего контроля благодаря своим техническим характеристикам не являются фиксированными зарождающихся дефектов, незначительные повреждения материала в размерах во время экзамена. Эти поражения, хотя и не превышают допустимые нормы, регулируемые, имеют тенденцию к развитию и, следовательно, наиболее опасны. С началом операции загрузки и появления объекта в грубом материале накопления повреждений, которые в конечном итоге привести к возникновению существенных дефектов и деградации. Как определить фактическое техническое состояние материала, определить его преддефектное состояние, и, следовательно, достоверно оценить уровень безопасности при эксплуатации объекта?

Эта проблема решается двумя способами. Первый - непрерывный мониторинг, который стремится захватить тот момент, когда растущий дефект превышает допустимую норму. Используя современные технологии, такой контроль может быть осуществлен, но в этом случае датчики должны быть установлены на объекте в процессе его производства, например, на трубопроводе, прежде чем он уложен в земле. Второй способ - объединить опыт эксплуатации с раннего выявления будущих повреждений, это означает, что идентификация областей возникновения дефектов, не обнаруживаемых традиционными средствами неразрушающего контроля; выявленных мест, где дефектов на момент обследования нет, но они, безусловно, будет в ближайшем будущем и это может приведет к внезапному повреждению оборудования.

Основные условия, наличие которых в структуре материала вызывает повреждение и могут привести к врожденным дефектам являются: уровень напряжений в материале, коррозионные процессы, усталость и ползучесть развиваются наиболее интенсивно; структурное состояние материала, особенно те области, в которых наиболее интенсивная структурная деградация металлического материала - наличие микротрещин. Наблюдение этих компонентов - гарантия объективности технического состояния опасных производственных объектов в эксплуатацию.

Сегодня контроль процессов возникновения и развития реализуется с помощью пассивных и активных методов. Пассивные методы, основанные на измерении физических полей структуры: метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий по сигналам акустической эмиссии определять для выявления областей повышенной скорости накопления повреждений; метод магнитной памяти металла (МППМ), в котором поиск зон концентрации напряжений, произведенные собственных магнитных полей рассеяния. Пассивный диагностики твердых сред, связанных с проблемой сверхчувствительных измерений, с необходимостью определения источника собственного шума и обнаружения его причин. Активные методы включают: метод коэрцитивной силы; метод магнитной анизотропии; методы, использующие эффект Баркгаузена. Они также включают в себя методы акустического зондирования.

Уникальность методов акустического зондирования заключается в том, что внутреннее пространство практически всех конструкционных материалов доступных для "видения" волны механической природы. Механические волны распространяются в твердой среде на большие расстояния, не вносят искажения в материале, возникающих в процессе и в то же время несут информацию о состоянии объекта.

Эти свойства имеют фундаментальное значение для проблемы оценки материалов и диагностики элементов машин, так как они применяются в большинстве важных случаев для определения напряженно-деформированного

состояния (НДС), для исследования структурных особенностей материала и определить регион происхождения трещин.

Известный обширный класс волновых явлений в упругой среде - это линейные, параметрические, нелинейные и т. д. [1-4], которые изучались многими исследователями от Рэлея для наших современников.

2 Объект и методы исследования

2.1 Общая характеристика предприятия «ЮргаВодтранс»

Основные характеристики общества с ограниченной ответственностью ООО «ЮргаВодтранс» г. Юрги:

Руководитель управляющей компании Чемякин Владимир Николаевич.

Адрес: 652050 Кемеровская область, город Юрга, улица Шоссейная 14 а.

Виды деятельности ООО «ЮргаВодтранс»:

Компания ООО «ЮргаВодтранс» в соответствии с кодами ОКВЭД, указанными при регистрации, осуществляет следующие виды деятельности :
Основные виды деятельности:

Сбор, очистка и распределение воды.

Дополнительные виды деятельности:

- Производство общестроительных работ.
- Производство общестроительных работ по прокладке магистральных трубопроводов, линий связи и линий электропередачи.
- Удаление и обработка твердых отходов.
- Удаление сточных вод, отходов и аналогичная деятельность.
- Управление эксплуатацией жилого фонда.

Виды регулируемой деятельности:

- холодное водоснабжение;
- водоотведение.

Холодное водоснабжение – это протяженность водопроводных сетей, которая равна 119,5 км, а также количество артезианских скважин – 6ед., насосных станций в количестве – 1 ед.

Водоотведение – очистные сооружения в количестве 1ед., канализационные сети, протяженностью 89,7 км, насосных станций – 3ед.

Основная деятельность предприятия ООО «ЮргаВодтранс» заключается в заборе воды из поверхностного (река Томь) и подземных источников водоснабжения, последующей затем ее очистке на очистных сооружениях водопровода, дезинфекции и затем по распределительной системе трубопровода подаче ее населению и предприятиям на хозяйственно-питьевые и производственные нужды.

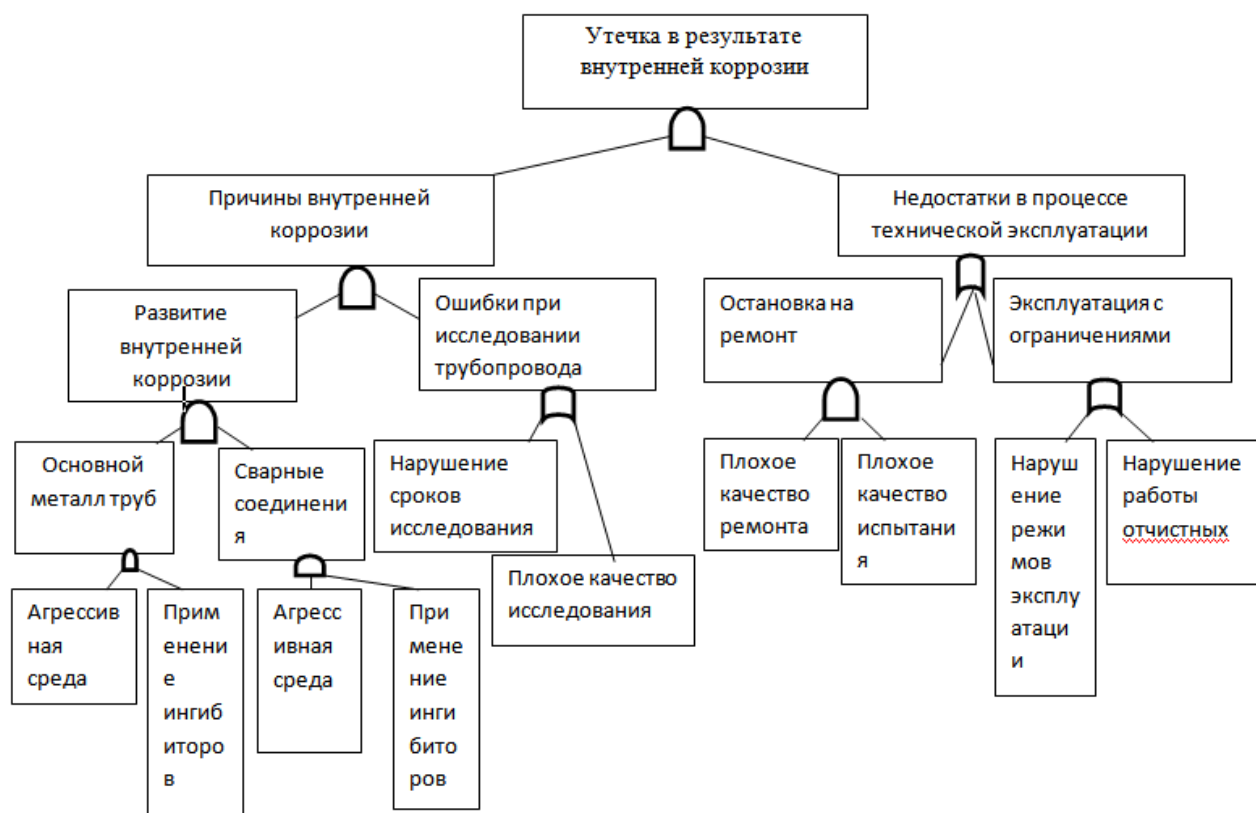


Рисунок 1 Дерево отказов для аварии, связанной с внутренней коррозией подводного трубопровода

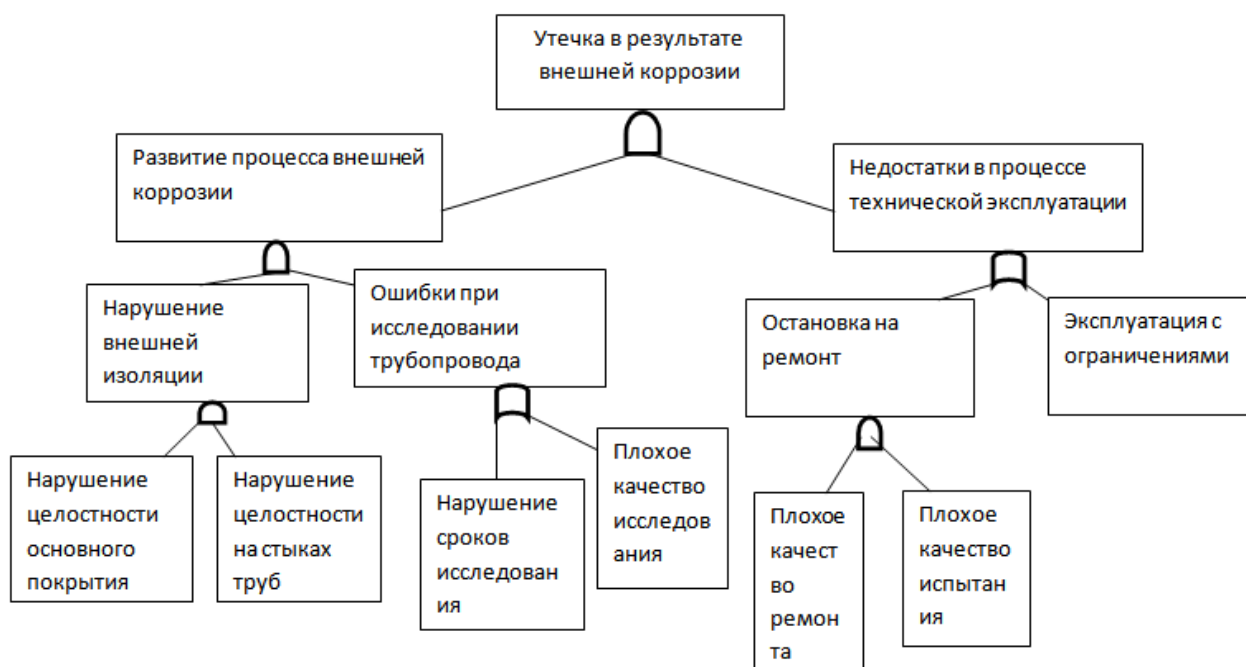


Рисунок 2 Дерево отказов для аварии, связанной с внешней коррозией подводного трубопровода.

2.2 Напряженно деформированное состояние в металлических конструкциях

В металлоконструкциях всегда присутствуют внутренние напряжения, сущность их заключается в следующем: внешняя удельная сила, «расщепляясь» на составляющие, воздействует на материал, деформируя его в разных направлениях (скольжения, нормального, широтного) и поворачивая в пространстве, вызывая тем самым соответствующие внутренние силы сопротивления материала деформированию, что и определяет, в конечном счете, затраты собственной энергии материала на противостояние внешней нагрузке. Деформации, которые мы можем измерить (продольная и поперечная) - это алгебраические суммы проекций векторов внутренних физических деформаций направления - вдоль и поперек оси приложенной силы [6].

Более того, можно сказать, что внутренние напряжения – это особая, единая энергетическая характеристика равновесного состояния материала,

которая определяется (рисунок 1.1) семейством физических деформационно-силовых параметров, отображающих разнообразные варианты изменения внутренней энергии, в результате различных вариантов воздействия на материал, воплощенный в конкретную форму.

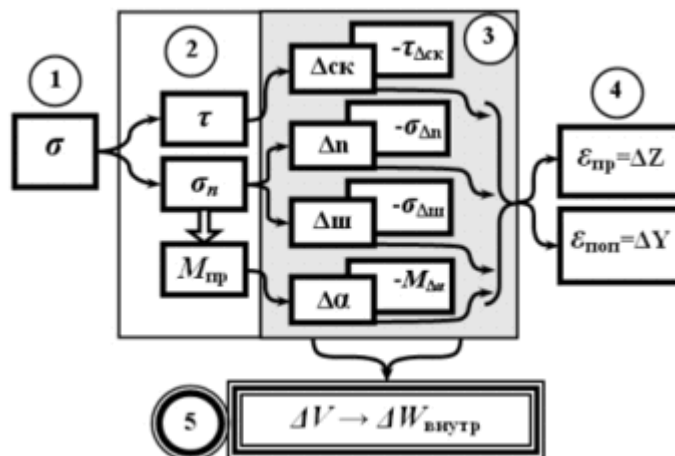


Рисунок 1 - Реакция материала на внешнее силовое воздействие

1 – внешняя удельная сила; 2 – силовые составляющие внешнего воздействия внутри материала; 3 – совокупность локальных деформаций и сопротивляемости материала внешним воздействиям – параметры внутренних напряжений; 4 – внешние характеристики реакции материала; 5 – внутренние напряжения – изменения плотности внутренней энергии

Изменения внутренних сил сопротивления материала в области неравномерного деформирования образца внешней растягивающей силе показаны на (рисунок 1.2), где для сравнения помещен график изменения внешней удельной силы [6].

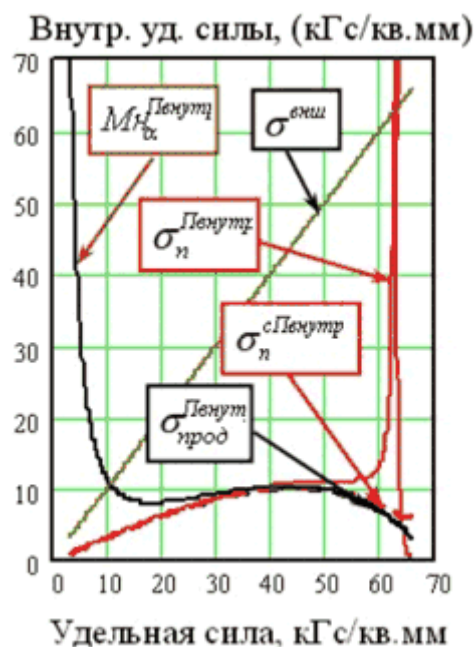


Рисунок 1.2 Зависимость внутренних сил сопротивления упругим и пластическим деформациям от удельной силы в области неравномерного деформирования: $\sigma^{\text{внш}}$ – напряжения от удельной силы внешней нагрузки; $\sigma^{\text{Пвнутр}}_{\text{Пвнутр}}$ – график напряжений от нормальной продольной пластической (механической) деформации; $\sigma^{\text{Пвнутр}}_n$ – график напряжений от нормальной продольной пластической (физической) деформации; $\sigma^{\text{сПвнутр}}_n$ – график изменения среднего по образцу значения внутренней силы сопротивления продольной деформации; $M_n^{\text{Пвнутр}}_\alpha$ – момент сопротивления пластическому изменению угла скольжения

2.3 Анализ существующих методов определения напряженно-деформированного состояния металлоконструкций

На территории России насчитывается около 100 тыс. потенциально опасных производств и объектов. В нефтяной и газовой промышленности эксплуатируется 150 тыс. км магистральных газопроводов и 49,6 тыс. км магистральных нефтепроводов.

Протяженность водопроводных и канализационных сетей составляет 270 тыс. км, в стране эксплуатируется 40 тыс. различных резервуаров, 22 тыс. городских мостов и путепроводов.

Каждый год на магистральных газонефтепроводах происходит большое количество аварий, наносящих огромный экологический ущерб.

Для обеспечения целостности и безопасности, строящихся и эксплуатируемых конструкций, изделий и сварных соединений необходима оценка ресурса, основанная на численных методах анализа и физических методах неразрушающего контроля [8].

Оценка внутренних действующих и остаточных напряжений является ключевой задачей, решение которой позволяет определить остаточный ресурс. Поэтому практический интерес представляет разработка и совершенствование эффективных методов и средств исследования напряженно-деформированного состояния.

Существующие методы определения напряженно-деформированного состояния приведены на рисунке.

Спекл - интерферометрия. Данный метод предполагает высверливание сквозного или несквозного отверстия в исследуемой точке на поверхности объекта и измерение деформации, вызванной упругой разгрузкой объема материала при освобождении остаточных напряжений в нескольких направлениях. Отверстие, используемое для упругой разгрузки остаточных напряжений, можно выполнять в любой точке участка, освещенного лазерным светом. При этом отраженные световые волны до и после выполнения отверстия с помощью CCD - камеры записываются в память компьютера и обрабатываются до получения величин остаточных напряжений.

Данный метод позволяет исследовать распределение напряжений по поверхности контролируемых объектов с высокой точностью (приблизительно 5 % предела текучести материала).

Рентгеновская дифрактометрия. Метод рентгеновской дифрактометрии [8] позволяет измерять остаточные напряжения на поверхности исследуемого объекта, не нарушая его сплошности. Применение рентгеновского излучения для исследования напряженно-деформированного состояния объекта основано на явлении его дифракции при прохождении через кристаллическую решетку исследуемого материала.

Непосредственно измеряемой величиной является смещение дифракционного профиля, которое есть следствие напряженно - деформированного состояния материала исследуемого объекта. Эта величина составляет доли градуса и должна измеряться с погрешностью, не превышающей сотые доли градуса. При определении напряжений в крупногабаритных объектах необходимо обеспечивать точное перемещение источника излучения и детектора относительно неподвижного объекта. Поскольку деформация измеряется в тонком (не более 10 - 13 мкм) поверхностном слое, требуется специальная подготовка поверхности с окончательной электрополировкой. Рентгеновский метод часто применяют в качестве эталонного при калибровке других методов.

Магнитные методы. Физической основой магнитных методов определения напряженно - деформированного состояния объекта является магнитоупругий эффект - изменение намагниченности тела от действия механических напряжений. В качестве магнитных характеристик используют остаточную намагниченность, коэрцитивную силу, магнитную проницаемость, магнитострикцию и др. Магнитные методы применимы для определения напряжения на поверхности исследуемого объекта из ферромагнитного материала.

В методе, основанном на измерении шумов Баркгаузена (ШБ), лежат микромагнитные явления смещения доменных границ под действием изменяющегося магнитного поля, внутренних напряжений или температуры. Основным информативным параметром магнитошумового метода является интенсивность (спектральная плотность) магнитного шума. Данный метод при условии методического разрешения неопределенности измерения позволяет

контролировать широкий спектр свойств ферромагнитных материалов при наличии корреляционной связи между ШБ и физико-механическими

Метод магнитной памяти металла [8] позволяет оценить изменение напряженности магнитного поля, но не дает количественной оценки действующих механических напряжений.

Акустическая тензометрия. Интегральную оценку напряжений по толщине материала производят при помощи измерения скорости распространения объемных ультразвуковых волн, распространяющихся по нормали к плоскости действия напряжений.

При распространении в нагруженном материале произвольной сдвиговой волны образуются две сдвиговые волны с взаимно перпендикулярными векторами поляризации (эффект двулучепреломления). При этом направление поляризации одной волны параллельно направлению приложенной нагрузки, а другой - перпендикулярно этому направлению. Распространяющиеся волны имеют разные скорости (акустическая анизотропия). Разность скоростей сдвиговых волн пропорциональна разности главных напряжений.

Акустические методы позволяют измерять как одноосные, так и двухосные напряжения растяжения - сжатия с погрешностью, не превышающей 5-10% предела текучести материала.

К недостаткам акустического метода можно отнести необходимость подготовки поверхности объекта контроля и применения контактной жидкости. В последнее время получили распространение бесконтактные электромагнитно-акустические преобразователи, лишенные данных недостатков. За счет применения таких преобразователей удалось повысить достоверность определения напряжений на реальных конструкциях.

Акустические методы позволяют получать усредненное значение напряжений по толщине, чего не удастся достичь другими методами [8].

2.4 Оптический способ определения напряженно - деформированного состояния

Визуально-оптический метод неразрушающего контроля основан на визуальном осмотре объектов контроля невооруженным глазом или при помощи оптических средств (лупа, микроскоп, эндоскоп, бароскоп и т.п.), а также на анализе результатов взаимодействия оптического излучения с объектом контроля. По характеру взаимодействия различают методы прошедшего, отражённого, рассеянного и индуцированного (люминесценция и флуоресценция) излучения.

Анализируемыми (информационными) параметрами при визуально-оптическом методе являются пространственно-временные распределения амплитуды, частоты, фазы, поляризации и когерентности (временной и пространственной) оптического излучения. При этом могут быть выявлены такие дефекты как, пустоты (нарушения сплошности), расслоения, поры, трещины, инородные включения, внутренние напряжения, изменения физико-химических свойств и структуры материалов, отклонение от заданной геометрической формы [9].

2.4.1 Оборудование для оптического контроля напряженно - деформированного состояния

При визуально - оптическом методе контроля для осмотра поверхности объекта контроля в увеличенном масштабе применяются *лупы* (в т.ч. измерительные) и микроскопы. Микроскопы, как правило, в зависимости от модификации, имеют увеличение от 4 до 1500 крат и при этом могут иметь измерительные функции. Отдельно следует выделить металлографические микроскопы, применяемые в одноименном методе - металлографии. Такие микроскопы позволяют исследовать макро- и микроструктуру металла с целью

выявления структурных аномалий, включений, межкристаллитной коррозии и т.д.

Для осмотра внутренних полостей объектов при затрудненном прямом доступе используются гибкие эндоскопы, жесткие эндоскопы (бароскопы) и видеоскопы. Такие приборы имеют различный диаметр и длину рабочей части, иметь артикуляцию дистальной части и возможность записи фото или видео изображения контролируемой поверхности.

Для контроля шероховатости поверхности и геометрии объектов применяются триангуляционные, интерференционные и голографические оптические методы [10].

2.5 Тензометрический способ определения напряженно - деформированного состояния

Тензометрический метод определения напряжённого состояния конструкций, основанный на измерении местных деформаций. Методы и средства тензометрии обеспечивают выявление причин разрушений по результатам исследования напряжённо - деформированного состояния элементов конструкции, позволяют находить наиболее оптимальные и совершенные конструктивные решения, изучать влияние различных технологических факторов на прочность конструкций и т. п.

Тензометрический метод объединяет большинство известных способов оценки напряженного состояния, однако чаще под тензометрией понимают совокупность прямых методов и средств измерения деформаций.

Тензодатчик представляет собой резистор, сопротивление которого изменяется при деформации. Его приклеивают к поверхности тестируемой детали, так, чтобы он деформировался вместе с ней. Используются одиночные тензорезисторы или блоки тензорезисторов, соединённые по схеме моста или полумоста [11].

2.5.1 Разновидности рентгеновских методов

Рентгенодифракционный анализ. Метод основан на получении и анализе дифракционной картины, возникающей в результате интерференции рентгеновских лучей, рассеянных электронами атомов облучаемого объекта. Эта картина определяется, помимо атомной и электронной структуры изучаемого объекта, еще и характеристикой рентгеновского излучения.

Рентгенодифракционный анализ позволяет исследовать поликристаллические и монокристаллические объекты как в виде объемных материалов, так и в виде тонких пленок. Для каждого из этих двух типов материалов имеется определенный набор параметров, определяемых с помощью рентгенодифракционного анализа.

Рентгеноспектральный микроанализ. Характеристическое рентгеновское излучение возбуждается в образце под воздействием электронного пучка электронов (5-50 кэВ). Определение элементного состава микрообъема проводится на основе сравнения характеристических рентгеновских линий анализируемого образца и эталона. Сканирование электронного пучка по поверхности образца дает возможность получать распределение анализируемого элемента по поверхности образца (в характеристических рентгеновских лучах).

Исследуемые материалы: полупроводники, металлы, керамика, композитные материалы, минералы, углеродные материалы (в том числе наноразмерные объекты), многослойные эпитаксиальные структуры, лазерные кристаллы, сцинтилляторы, люминофоры, геологические объекты.

В состав приборов входят: блок, выполненный на основе малогабаритного рентгеновского излучателя с термостатированным полупроводниковым кремниевым pin -детектором, узел электромеханической блокировки включения-выключения высокого напряжения рентгеновского излучателя через блок управления для обеспечения радиационной безопасности при работе с

прибором; блок обработки и накопления спектрометрической информации; портативный компьютер типа Notebook, снабженный специализированным программным обеспечением, и блок автономного питания прибора.

Конструкция датчика полностью обеспечивает защиту персонала от облучения [15].

2.6 Магнитный способ определения напряженно - деформированного состояния

Метод магнитной памяти — новое направление в технической диагностике оборудования и конструкций. Он объединяет возможности неразрушающего контроля и механики разрушений, вследствие чего имеет ряд существенных преимуществ перед другими методами при контроле промышленных объектов. Метод не требует специальной подготовки поверхности объекта контроля (зачистки металла и пр.) и применения специальных намагничивающих устройств, так как используется явление намагничивания оборудования и конструкций в процессе их изготовления и эксплуатации [16].

Необратимое изменение намагниченности в направлении действия главных напряжений от рабочих нагрузок, а также остаточную намагниченность деталей и сварных соединений после их изготовления и охлаждения в магнитном поле Земли предложено называть магнитной памятью металла. Уникальность метода магнитной памяти заключается также в том, что он основан на использовании собственного магнитного поля рассеяния, возникающего в зонах устойчивых полос скольжения дислокации, обусловленных действием рабочих нагрузок.

Области применения ММП:

Контроль качества металла и сварных соединений изделий, технологии их изготовления (в т.ч. контроль качества термической обработки) на

машиностроительных заводах; контроль трубопроводов, сосудов, оборудования, любых конструкций и изделий (из ферромагнитного и парамагнитного аустенитного материала) во всех отраслях промышленности при изготовлении, ремонте и эксплуатации; контроль грузоподъемных и вращающихся механизмов; исследование механических свойств металла в лабораторных условиях.

Интерес специалистов различных отраслей к принципиально новому магнитному методу неразрушающего контроля в последние годы значительно возрос, несмотря на противоречивые отзывы, которые имеют место при внедрении метода на практике. Объективному восприятию метода мешает сложившаяся психология специалистов дефектоскопии – поиск и нахождение конкретного дефекта. Однако многие специалисты уже понимают, что более опасным во многих случаях (особенно после длительной эксплуатации оборудования) является преддефектное состояние металла (когда на уровне структуры произошли необратимые изменения) и повреждение из-за усталости металла может произойти внезапно и, как правило, в тех зонах, где оно не ожидается [16].

Уровень чувствительности традиционных методов НК не позволяет выявить преддефектное состояние металла. Именно на решение этой задачи направлена методология контроля, использующая магнитную память металла. Интерес к методу обусловлен также нерешенными проблемами, которые возникают на практике при обеспечении надежности и определении ресурса оборудования. Традиционные методы НК напряженно-деформированного состояния оборудования (рентген, УЗК, тензометрирование и др.) оказались малоэффективными при широком их внедрении на практике.

Внедрения.

Более чем 10-летний опыт внедрения метода магнитной памяти металла выявил его уникальные возможности именно для оценки напряженно-деформированных состояний и для диагностики прочности оборудования и

конструкций. С 1990 по 2002 гг. на промышленных предприятиях исследовано состояние более 300 паровых и водогрейных котлов, 200 паровых и газовых турбин, более 200 сосудов и аппаратов, более 250 км трубопроводов различного технологического назначения, выполнен контроль качества изделий более чем на 50 заводах и фирмах России и других стран. Проведен экспериментальный контроль рельсов и колесных пар на предприятиях железнодорожного транспорта, мостовых конструкций, грузоподъемных механизмов и других технических объектов.

Принцип исследования методом магнитной памяти: нагруженное контролируемое изделие намагничивают с помощью магнитоупругих преобразователей, установленных с зазором относительно изделия, измеряют параметры выходных сигналов преобразователей, выделяют первую гармонику ЭДС измерительных обмоток преобразователей, аналогичные измерения проводят, намагничивая этими же преобразователями аналогично нагруженный эталонный образец, изготовленный из материала контролируемого изделия и имеющий его температуру и с учетом измеренных параметров определяют механические напряжения, намагничивание проводят в диапазоне частот 10-30 Гц, в качестве параметров выходных сигналов измерительных обмоток преобразователей используют нечетные гармоники ЭДС и числа скачков Баркгаузена, причем при измерении последнего параметра первую гармонику ЭДС поддерживают постоянной для данного материала, а о механических напряжениях судят по сравнению измеренных параметров контролируемого изделия и образца [17].

2.7 Способ определения напряженно-деформированного состояния акустоупругостью

Метод акустоупругости – это метод неразрушающего контроля, позволяющий измерять мембранные (усредненные по толщине материала)

значения механических напряжений. Другие известные методы (рентгеновская дифрактометрия, лазерные и магнитные методы, традиционная тензометрия) обеспечивают возможность измерений только поверхностных напряжений, которые часто, особенно для толстостенных конструкций, характерных для атомной энергетики, не совпадают с мембранными значениями, определяющими прочностные характеристики конструкции. Дополнительным фактором, определяющим актуальность измерения мембранных напряжений, является возможность оценки напряжений по задней стенке элементов сосудов и трубопроводов, непосредственно соприкасающейся с коррозионной средой [1].

Задача аппаратной реализации метода акустоупругости решена в выпускаемом фирмой «Инкотес» компактном переносном приборе для измерений механических напряжений ИН 5101А, который обеспечивает формирование упругих волн, и измерение с необходимой точностью времени их распространения. Прибор внесен в Государственный реестр средств измерений (Сертификат об утверждении типа средств измерений № RU.C.28.011.A № 20395) [1].

Документ устанавливает методику выполнения измерений осевых и окружных механических напряжений 1-го рода, возникающих в результате технологических воздействий, усредненных по толщине материала, в условиях упругой деформации. Объектами измерений являются полые цилиндрические элементы оборудования и трубы диаметром 325-1420 мм (Ду300-Ду1400) с толщиной стенки не более 0,1 наружного диаметра цилиндра, изготовленные из перлитных и аустенитных сталей. МВИ обеспечивает измерение механических напряжений (сжатие и растяжение) со следующими характеристиками погрешности:

- от 0 МПа до 100 МПа вкл. – 15 МПа;
- свыше 100 МПа до 480 МПа вкл. – 9,5 % относительно.

МВИ предусматривает три режима измерений: Режим 1 - «акустическая тензометрия» (АТ). В этом режиме измеряются механические напряжения, возникающие в точке контроля в результате технологических воздействий. Режим 2 - «разностная акустическая тензометрия» (РАТ). В этом режиме измерения проводятся в точке контроля и в, так называемой, «условно-нулевой» точке. Измеряемые механические напряжения соответствуют разности напряжений, действующих в точке контроля и «условно-нулевой» точке. В качестве «условно-нулевой» точки используется одна из точек, расположенных в опорной зоне - участке объекта контроля, находящемся вне зоны технологического воздействия. Режим 3 - «безнулевая акустическая тензометрия» (БАТ). Этот режим аналогичен режиму РАТ, но в качестве «условно-нулевой» точки используется точка, расположенная на образце-представителе материала объекта, находящемся в ненапряженном состоянии. Режим используется в случае, если анализ технологической документации показал, что зона, свободная от технологического воздействия на объекте отсутствует, или, если выбранная при проведении измерений в режиме 2 точка не соответствует установленному критерию [1].

2.7.1 Сущность определения напряженно-деформированного состояния методом акустоупругостью

Методические основы определения плоского напряжённого состояния конструкционных материалов с помощью объёмных упругих волн, в которой рассмотрены основные принципы применения акустоупругого эффекта для определения двухосных напряжений с помощью объёмных волн, распространяющихся по нормали к плоскости действия напряжений. Построены простые расчётные алгоритмы для вычисления напряжений растяжения-сжатия, действующих вдоль осей симметрии материала, по результатам измерения времени распространения сдвиговых и продольной волн. Формулы учитывают

изменение акустического пути при деформации, изменение температурного режима от измерения к измерению. Приведены упрощенные выражения для таких практических случаев, когда невозможно измерить те или иные параметры уравнений акустоупругости, проведена оценка дополнительной погрешности метода в том или ином случае [18].

Рассмотрим некоторые результаты разработки импульсного акустического метода определения напряжений с помощью объёмных упругих волн, пригодного для использования в лабораторных, цеховых и натурных условиях.

Известно [1], что вдоль выделенного направления в напряжённом гиперупругом (hyperelastic) материале, то есть в таком, деформированное состояние которого адекватно описывается потенциальной функцией деформации, могут распространяться три волны с ортогональными векторами поляризации и с различными в общем случае скоростями. В частности, в несжимаемом гиперупругом материале векторы поляризации сдвиговых волн обязательно ортогональны, а квадраты их скоростей - действительны [1]. В сжимаемом материале величины скоростей зависят от главных удлинений в трёх взаимно перпендикулярных направлениях, которые составляют таким образом определённый ортогональный базис [1].

Если к тому же сдвиговые напряжения отсутствуют, а растяжения (сжатия) приложены вдоль осей симметрии материала, то направления главных удлинений и главных напряжений совпадают. Выбрав направлением распространения волн одно из этих направлений, мы и получим указанный ортогональный базис, вследствие чего ни волновые вектора, ни вектора поляризации волн под действием напряжений поворачиваться не будут (нелинейной рефракции упругих волн не будет). Во многих элементах конструкций, один из поперечных размеров которых существенно меньше двух других, реализуется плоское напряжённое состояние, или его можно с большой степенью точности считать плоским, в том числе (для конструкций типа

оболочек) локально плоским в том объёме материала, где «пробегают» зондирующие волны. Это один из практических случаев, допускающих возможность экспериментального осуществления явления акустоупругости с помощью объёмных волн, распространяющихся перпендикулярно плоскости действия напряжений (рисунок 2) [1].

На основе этих исследований была предпринята попытка создания нормативной базы для более широкого использования упруго-акустического эффекта.

Разработанная при участии автора методика содержит алгоритмы расчёта двухосного (плоского) напряжённого состояния изотропного материала по изменению скоростей сдвиговых волн. Коэффициенты связи скоростей и напряжений рассчитаны для трёх вариантов теории начальных деформаций. Описан метод определения напряжений, основанный на измерении скоростей поверхностных упругих волн. Сформулированы некоторые требования к объекту исследования и к измерительной аппаратуре. Методика утверждена профильным институтом Госстандарта и рекомендована к практическому использованию в НИИ, КБ и заводских лабораториях [1].

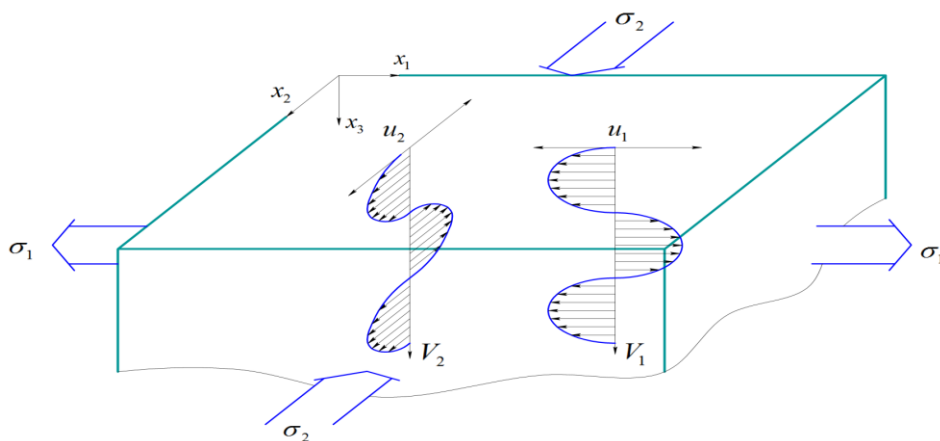


Рисунок 2 - «Геометрия» двулучепреломления в напряжённой среде

В дальнейшем, при применении нормативного документа для определения напряжений в реальных конструкциях (в основном с

использованием объёмных волн), выяснилось, что рекомендуемые вычислительные процедуры нуждаются в усовершенствовании. Формулы связи напряжений со скоростями упругих волн аналогичны выражениям (2.1) (для случая конечных начальных деформаций, что соответствует практике неразрушающего контроля, когда волны малой амплитуды распространяются в среде с существенными напряжениями и деформациями) и содержат в качестве коэффициентов уравнений комбинации констант упругости второго и третьего порядков. Соответствующие нормативные документы для определения констант линейной и нелинейной упругости (в рамках пятиконстантной теории упругости) также были к тому времени разработаны и утверждены в установленном порядке. Но дело в том, что первые возможно определить с погрешностью до одного-нескольких процентов, а последние, из-за малости нелинейных параметров твёрдого тела, - в лучшем случае с погрешностью 20 % [1], что приводит к существенным ошибкам при вычислении коэффициентов пропорциональности напряжений и скоростей. Кроме того, скорость как таковая не является непосредственно измеряемым параметром: измеряется путь, пройденный волной, и время, за которое он пройден (или, например, частота повторения импульсов).

Пути решения этих проблем также стали ясны: надо непосредственно использовать те комбинации упругих модулей, которые являются коэффициентами уравнений акустоупругости, и, либо учесть разницу между действительной и естественной скоростью в расчётных алгоритмах, либо перейти в них к практически измеряемым параметрам. Примером более подходящих алгоритмов являются, например, формулы (2.2) для "естественной" скорости волн, которая в конечном счёте есть обратное время распространения. Для случая одноосного напряжённого состояния, в основном реализуемого в деталях и элементах конструкций, один из характерных размеров которых значительно больше двух других, указанные проблемы были в своё время решены В. М. Бобренко [1] путём введения понятия

«акустоупругого коэффициента» (2.3) со всеми вытекающими отсюда последствиями, а также путём перехода в алгоритмах к временным параметрам и учёта «деформационного» коэффициента, зависящего от «взаимного расположения направления усилия и волнового вектора» и определяющего «величину изменения пути ультразвука вследствие деформации». Тут надо заметить, что для тех способов определения напряжений, когда волны распространяются в направлении действия напряжения, изменение акустического пути связано с деформацией не через коэффициент Пуассона, а самым непосредственным образом, поэтому учёт последнего фактора ещё более важен, чем для тех способов, где используется явление акустического двулучепреломления (acoustical birefringence). Именно такие случаи и рассматриваются В. М. Бобренко с соавторами, и ими, в частности, предложено использовать разницу относительных времён распространения продольной и сдвиговой волны для оценки величины одноосного напряжения, избавляясь, таким образом, от необходимости учёта изменения акустического пути при деформации материала. Аналогичные пути решения указанных проблем были впоследствии предложены и киевскими исследователями для двухосного напряжённого состояния. Действительно, используя формулы (2.4), можно перейти к разностям изменений скоростей сдвиговых и продольной волн, а там уж недалеко и до использования в алгоритмах непосредственно измеряемых параметров (частоты, периода, другого временного интервала). Обобщая результаты собственных и других исследований, можно предложить следующую схему построения и использования алгоритмов практического расчёта плоского напряжённого состояния по измерению параметров акустоупругого эффекта.

Так как в основном плоские детали и элементы конструкций изготавливаются из листового проката и, разумеется, специально не вырезаются под углом к направлению прокатки (коэффициент использования

материала!), считать, что материал ортотропный и вдоль его осей симметрии действуют напряжения растяжения-сжатия.

Взять в качестве основы простые и логичные соотношения, аналогичные уравнениям фотоупругости, как сделано в работе, при этом удерживать анизотропные свойства материала только в значениях скоростей, а соответствующие комбинации констант упругости считать не зависящими от направления приложения напряжений и вида напряжённого состояния [1].

Насколько это, возможно, перейти в уравнениях к непосредственно измеряемым параметрам и к безразмерным (относительным) величинам.

Предложить способы измерения информативных параметров, упругих волн, отвечающие в рамках тех или иных условий эксперимента высоким требованиям точности и достоверности измерений, характерным для практического использования таких «слабых» эффектов, как явление акустоупругости в реальном конструкционном материале.

Дать конкретные методики экспериментального определения коэффициентов уравнений, содержащих нужные комбинации констант линейной и нелинейной упругости исследуемого материала.

По возможности учесть в алгоритмах основные внутренние и внешние факторы, которые существенно влияют на точность и достоверность окончательного результата исследований, однако не усложнять расчётные формулы до такой степени, что погрешность вычисления этого результата значительно превысит погрешности проводимых измерений.

Хорошо представлять себе при этом те ограничения, которые наложены на возможность идентификации напряжённого состояния в каждом конкретном практическом случае уже на этапе алгоритмического обеспечения, не говоря уже о точности самих измерений.

Запишем соотношения линейной акустоупругости в виде:

$$V_1 = V_{01}(1 + k_1\delta_1 + k_2\delta_2) , \quad (2.2)$$

$$V_2 = V_{02}(1 + k_2\delta_1 + k_1\delta_2) , \quad (2.3)$$

где k_1, k_2 - коэффициенты акустоупругой связи, которые определяют чувствительность скорости сдвиговых волн к напряжениям, действующим вдоль и поперёк направления поляризации волны (соответственно).

Может быть, правильнее их было бы называть "акустоупругими коэффициентами", тем самым отдавая дань уважения предшественникам и не засоряя язык новыми терминами наряду с уже существующими, однако так уж сложилось. Заметим, что тогда это бы были АУК, а «обратные» им величины - УАК, что настраивает на несерьёзный лад [1].

Вследствие деформации материала не только время, но и расстояние, пройденное волной, изменяется, и эти изменения по порядку величины сравнимы. Системы уравнений (2.2, 2.3) достаточно для определения двух значений напряжений только в том случае, когда измеряется естественная (natural) скорость, относящаяся к первоначальной длине акустического пути. Это может быть обеспечено в тех случаях, когда измерения проводятся на фиксированной базе, например, поверхностные волны распространяются между жёстко закрепленными излучателем и приёмником. При использовании объёмных волн, распространяющихся по нормали к плоскости действия напряжений, очевидно, измеряется действительная (real) скорость, относящаяся к изменяющейся толщине материала. Для учёта изменения акустического пути при деформации материала приходится привлекать и третью из распространяющихся в выбранном направлении объёмных волн - продольную [1]. Уравнение для нее запишем в виде:

$$V_3 = V_{O3}(1 + k_3\delta_1 + k_3\delta_2), \quad (2.4)$$

где величина k_3 определяет чувствительность скорости продольных волн к напряжениям, действующим в плоскости, перпендикулярной направлению их распространения. Коэффициенты акустоупругой связи k_1, k_2 и k_3 предлагается определять экспериментально, например, при одноосном растяжении (сжатии) стандартных образцов исследуемого материала [1].

Не забудем также, что «напрямую» скорости зависят не от напряжений (которые, вообще говоря, являются плодами наших понятий об окружающем мире, а не его самого, как и порождающее их понятие «силы»), а от перемещений (деформаций), характеризующих внутреннее состояние упругого тела. В этом смысле метод акустоупругости близок к обычной тензометрии или к рентгеновскому методу, которые, в сущности, основаны на прямом измерении "искажений" расположения частиц среды, в макро- или микромасштабе, соответственно [18].

Были в истории науки и попытки избавиться от химер, и тому есть пример – «бессилловая механика» Генриха Герца, с которой я, признаюсь, знакома «понаслышке», по науковедческой и научно-популярной литературе. Мой главный авторитет в механике П. А. Жилин более всего почитает механику Эйлера, а по поводу механики Герца считает, что она «никуда не годится». Значит, так оно и есть. Оказывается, и Жак Даламбер « всю жизнь пытался изгнать силы из механики», как бы впоследствии ни трактовали знаменитый Принцип Даламбера. Однако вышло « всё наоборот» - как в науке-технике, так, похоже, и в обществе частенько наблюдаются картины того, как «хвост управляет лошадей»... [1].

В настоящее время нормативная база прочностных испытаний и расчётов в основном «действует по понятиям» напряжений, а не деформаций, поэтому практические результаты экспериментальных исследований НДС материалов и конструкций так или иначе должны быть связаны с поиском ответа на вопрос: «какие нагрузки может выдержать конструкция и как долго?», а не на вопрос: «насколько опасны деформации, возникающие в материале конструкции при тех или иных внешних воздействиях?» И надо постараться вписаться в сложившуюся систему и найти как можно более прямые связи между величинами «действующих» напряжений и измеряемых акустических параметров [18].

Вернёмся, поэтому, «с небес на землю» и запишем систему уравнений для определения главных напряжений, действующих вдоль осей симметрии материала, по результатам измерения времени распространения упругих волн, в следующем виде [1].

$$\begin{aligned} k_1 \delta_1 + k_2 \delta_2 &= \frac{L}{t_1} \frac{t_{01}}{L_0} - 1, \\ k_2 \delta_1 + k_1 \delta_2 &= \frac{L}{t_2} \frac{t_{02}}{L_0} - 1, \\ k_3 \delta_1 + k_3 \delta_2 &= \frac{L}{t_3} \frac{t_{03}}{L_0} - 1, \end{aligned} \quad (2.5)$$

где L_0, L - путь распространения волн до и после возникновения напряжений;
 t_{0i}, t_i - время, за которое этот путь пройден ($i=1,2,3$).

Воспользовавшись третьим уравнением, исключим изменение толщины материала $\frac{h}{h_0} = \frac{L}{L_0}$ из системы уравнений (2.5), тогда она примет вид:

$$\begin{aligned} \left(k_1 - \frac{t_3 t_{01}}{t_{03} t_1} k_3 \right) \delta_1 + \left(k_2 - \frac{t_3 t_{01}}{t_{03} t_1} k_3 \right) \delta_2 &= \left(\frac{t_3 t_{01}}{t_{03} t_1} - 1 \right), \\ \left(k_2 - \frac{t_3 t_{02}}{t_{03} t_2} k_3 \right) \delta_1 + \left(k_1 - \frac{t_3 t_{02}}{t_{03} t_2} k_3 \right) \delta_2 &= \left(\frac{t_3 t_{02}}{t_{03} t_2} - 1 \right). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Система (2.6) уже содержит величины безразмерных акустических параметров, не зависящих от изменения толщины материала, и позволяет определить два значения напряжений при известных значениях КАУС. Обозначив:

$$\Delta_1 = \left(\frac{t_3 t_{01}}{t_1 t_{03}} - 1 \right), \Delta_2 = \left(\frac{t_3 t_{02}}{t_2 t_{03}} - 1 \right),$$

запишем уравнения (2.6) в форме:

$$\begin{aligned} [k_1 - (1 + \Delta_1) k_3] \delta_1 + [k_2 - (1 + \Delta_2) k_3] \delta_2 &= \Delta_1, \\ [k_2 - (1 + \Delta_2) k_3] \delta_1 + [k_1 - (1 + \Delta_1) k_3] \delta_2 &= \Delta_2. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Пренебрегая величинами Δ_1, Δ_2 по сравнению с единицей в круглых скобках, можно получить достаточно простой алгоритм определения плоского напряжённого состояния по результатам акустических измерений [1]:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= K_1 \Delta_1 - K_2 \Delta_2, \\ \delta_2 &= K_1 \Delta_2 - K_2 \Delta_1,\end{aligned}\tag{2.8}$$

$$\text{где } K_1 = \frac{k_1 - k_3}{(k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2}, K_2 = \frac{k_2 - k_3}{(k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2}$$

коэффициенты упругоакустической связи (КУАС) материала. Величины КУАС здесь зависят только от упругих свойств материала, имеют размерность напряжений (модулей упругости) и могут быть вычислены по результатам тарировочного эксперимента. Они содержат только разности КАУС, что является следствием учёта изменения акустического пути при возникновении напряжений [18].

Может быть, заранее известно или выясниться в результате вычисления напряжений, что напряжённое состояние элемента конструкции одноосное. Тогда, при наших допущениях, для расчёта напряжения достаточно знания времени распространения двух типов волн. Учитывая наибольшую чувствительность к напряжению волны, поляризованной вдоль направления его действия, формулу для его определения запишем в виде:

$$\delta_1 = \frac{1}{k_1 - k_i} \left(\frac{t_i}{t_1} \frac{t_{01}}{t_{0i}} - 1 \right),\tag{2.9}$$

Ясно, что определение одноосного напряжения по величине акустического двулучепреломления формула (2.10) – наиболее предпочтительный вариант. Здесь нет проблем ни с поперечной деформацией, ни со сравнением акустических характеристик различных типов волн. Однако в некоторых практических случаях можно воспользоваться тем плюсом, что одна из волн у нас «лишняя». В том случае, когда небольшие поперечные размеры детали, наличие продольных трещин, склеек, пазов не позволяют обеспечить распро-

странение сдвиговой волны с поляризацией, перпендикулярной направлению действия напряжения, расчёт производится по формуле (2.9) при $i = 3$,

$$\text{где } D_1 = \frac{1}{k_1 - k_3} = D \left(1 - \frac{K_2}{K_1} \right) \approx K_1 < D.$$

(по абсолютной величине). Если же, наоборот, невозможно обеспечить возбуждение и приём сдвиговой волны, поляризованной в направлении 1, то напряжение определяется по формуле:

$$\delta_1 = \frac{1}{k_2 - k_3} \left(\frac{t_3}{t_2} \frac{t_{02}}{t_{03}} - 1 \right), \quad (2.11)$$

$$\text{где } D_2 = \frac{1}{k_2 - k_3} = D \left(\frac{K_1}{K_2} - 1 \right) \approx K_1 \frac{K_1}{K_2} > D \text{ (по абсолютной величине).}$$

Поскольку практика акустических измерений показывает, что задержки t_2, t_3 при приложении напряжения в направлении 1 изменяются в одну сторону (обе убывают или возрастают), то величина информативного акустического параметра в формуле (2.11) будет гораздо меньше, чем в формуле (2.9) при $i=2,3$. Соответственно, величина коэффициента D_2 значительно превышает величины D, D_1 , и точность определения напряжения по формуле (2.11) будет гораздо меньше, чем при использовании выражения (2.9). Разумеется, здесь логичнее использовать волны, бегущие вдоль детали, но мы уже договорились, что этот вопрос здесь не рассматриваем, он неплохо изучен ранее и решается по-другому [18].

В нашем случае возможно использование стандартных образцов и машин для механических испытаний при определении КАУС и КУАС, что практически очень важно.

Как уже указывалось ранее, эти величины зависят от упругих и нелинейно-упругих свойств материала. В цитируемой работе сообщается об изменении констант Мурнагана 1 и m в 2-3 раза в процессе деформации материала до 10%. А как было выявлено в первых успешных попытках

экспериментального определения модулей квадратичной упругости, они обычно на порядок больше, чем модули линейной упругости. Значит, для изделий из листового проката, подверженных дальнейшей технологической обработке, связанной с высокими уровнями пластических деформаций, приближение «линейно-анизотропного», но «нелинейноизотропного» материала окажется слишком грубым, и уравнения акустоупругости придётся модифицировать [1].

3 Обзор методов акустического зондирования в экспериментальной механике

В главе дается краткий обзор существующих в настоящее время методов акустического зондирования, применяемых в экспериментальной механике. Основной целью обзора, представленного в данной главе является оценка значимости выбранного направления исследований. Показана эффективность использования акустического зондирования как одного из инструментов активной высокочастотной диагностики для измерения констант упругости твердых сред; для оценки напряженно-деформированного состояния и исследования динамических явлений применительно к практическим задачам динамики машин и конструкций.

3.1.1 Пассивная диагностика

К методам пассивной диагностики можно отнести методы акустической эмиссии; методы, связанные с измерением колебаний на поверхности и т.д. Как это видно из (рисунок 3.1), пассивные методы требуют меньшего, по сравнению с активными методами, технического обеспечения. Отсутствует этап «воздействие», что делает пассивные методы более доступными и простыми в эксплуатации (например, измерение общего уровня шума или вибрации), чем активные.

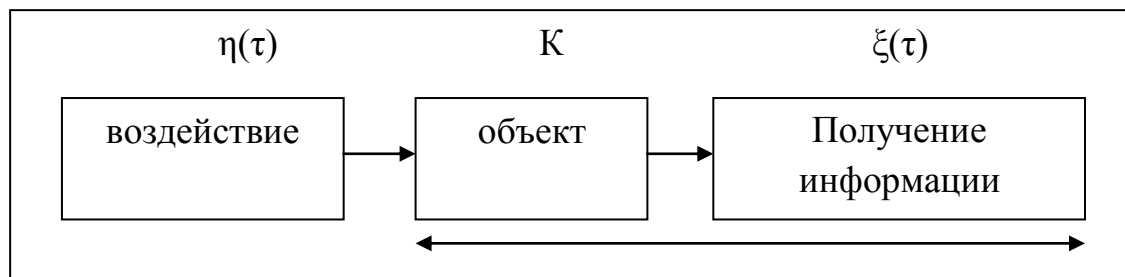


Рисунок 3.1 - Этапы проведения диагностики

Во многих случаях при проведении пассивной диагностики привлекается хорошо известная, «традиционная» математика, необходимая для обработки информации и постановки диагноза. Например, при диагностике объекта по «концепции отклонения» сравнивают уровень измеряемой величины с заданным пороговым значением. Подавляющее большинство машин, механизмов, конструкций при эксплуатации «генерируют», информацию различной природы, связанной с дефектами [19]. Например, генераторами возбуждения виброакустического поля работающей машины могут быть дисбаланс ротора, турбулентность потока газа или жидкости, кинематические погрешности изготовления и сборки, зазоры, изменение параметров механической системы во времени, нарушение чистоты и геометрии контактирующих поверхностей, удары и бесконечное множество других причин. Поэтому отклонение какого-либо параметра виброакустического поля от порогового значения свидетельствует об отклонении технического состояния объекта от нормального. Пассивные методы, в том числе и «концепция отклонения», оказались весьма эффективными и плодотворными на практике. Как правило, системы диагностики подобного типа включают автоматизированную многоканальную систему сбора информации; процессоры и компьютеры, обеспечивающие обработку информации в реальном масштабе времени; системы организации и управления механизмами.

В отличие от функционирующей машины, твердая среда, конструкционный материал самостоятельно не «генерирует» информацию, связанную с дефектами технического состояния. «Собственное излучение» или собственный шум среды (например [5], коллективные движения атомов в кристалле, представляющие собой звуковые волны), конечно, существует.

Таким образом, пассивная диагностика твердой среды связана с проблемой сверхчувствительных измерений; необходимостью идентификации источника собственного шума и обнаружение причины его возникновения. Во многих случаях эти проблемы пассивной диагностики материала не имеют

приемлемого на практике решения. Вследствие этого для оценки состояния материалов пассивные методы менее распространены, чем активные, которые не редко оказываются наиболее эффективными методами диагностики материала.

3.1.2 Активная диагностика

При реализации пассивных методов диагностики сигнал, воспринимаемый датчиком, установленном на объекте или в окружающей объект среде, содержит как нужную информацию о состоянии определенного узла, так и ненужную - помехи. Поэтому проблема формирования диагностических признаков неразрывно связана с проблемой выделения полезного сигнала на фоне помех. Для этой цели необходимо использовать различные технические приемы, математические методы и др. Положительная сторона активной диагностики состоит в том, что в сигнале, воспринимаемом датчиком, заранее определен способ получения нужной информации. Задавая воздействие $\xi(\tau)$ на объект, добиваются достоверного приема отклика объекта $\eta(\tau)$ на это воздействие. Объект осуществляет преобразование функции $\xi(\tau)$ в функцию $\eta(\tau)$. Это преобразование можно записать в форме оператора: $\eta(\tau) = K * [\xi(\tau)]$.

Математический аппарат активной диагностики, привлекаемый для обработки информации, при оценке технического состояния материала сугубо индивидуален. Он обусловлен моделью взаимодействия тестового сигнала с объектом, типом тестового воздействия и т.д. Нестандартность, индивидуальность активных методов делает диагностику более трудоемкой и сложной в техническом отношении, чем пассивные методы. В то же время возможность выбора типа воздействия позволяет исследователю найти необходимый инструмент изучения физико-механических свойств материала.

Основное внимание в работе уделено такому типу воздействия на

материал, который имеет волновую, механическую природу. Приведем критерий, какое воздействие или возмущение считать волновым [2]. Если характерный размер системы $L < cT$, где c - скорость распространения возмущения, T - время заметного изменения этого возмущения, то о процессе следует говорить как о колебательном', происходящим в системе с сосредоточенными параметрами. Если $L > cT$, то систему следует считать распределенной, а происходящий в ней процесс - волновым.

Механические волны представляют собой естественное, а не инородное поле для твердых тел, а значит обычно непрозрачные конструкционные материалы для волны механической природы «прозрачны». Волны могут беспрепятственно распространяться в твердой среде на достаточно большие расстояния и в заданном направлении. Они могут взаимодействовать со средой не внося искажений в происходящие там процессы, одновременно реализуя функции некоего уникального «бестелесного» датчика, поставляющие сведения о параметрах среды. При необходимости «заглянуть» во внутренние области твердых сред преимущества методов активной диагностики, в частности методов, основанных на зондировании объекта пучками волн механической природы неоспоримы.

Частотный диапазон используемых в диагностике волн механической природы необычайно широк. Наиболее низкочастотные волны используются в сейсмике, в резонансных испытаниях, где измеряемые характеристики являются макроскопическими и отражают общее состояние твердой среды. Высокочастотные волны, в противоположность низкочастотным, зондируют локальный участок твердого тела, определяемый базой измерения и направлением луча волн.

Направление исследований, можно классифицировать, согласно (рисунок 3.2), как активная высокочастотная диагностика, заключающаяся в зондировании материала волнами механической природы высокой частоты. Принципы акустического зондирования твердых сред базируются на

разнообразных акустических явлениях, выбор которых из множества акустических эффектов имеющих место быть в твердых средах, в значительной степени определяется практическими проблемами, возникающими при попытке адаптации какого-либо фундаментального волнового эффекта к конкретным методам измерения конкретных физико-механических характеристик материала.

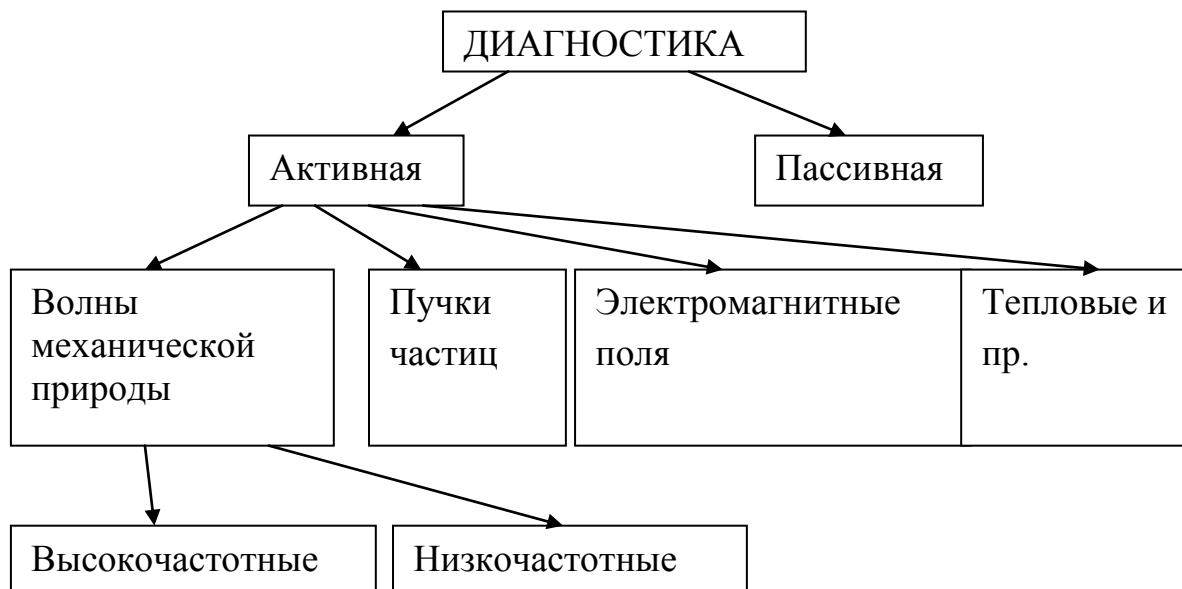


Рисунок 3.2 - Классификация видов диагностики

3.2 Применение акустического зондирования на примере трубопроводов

3.2.1 Технология определения механических напряжений в трубопроводах на основе явления акустоупругости

Ряд важных вопросов повышения надежности и долговечности трубопроводов можно решить с помощью современных методов неразрушающего контроля напряженного состояния металла труб при их изготовлении, монтаже и эксплуатации. Новейшая разработка в этой области – прибор ИН-5101А, обеспечивающий измерения одно- и двухосных

напряжений растяжения-сжатия в конструкционных материалах и элементах конструкций на основе явления акустоупругости. Возможности прибора подтверждены сертификатом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. Программное обеспечение прибора позволяет проводить акустические измерения с высокой точностью и автоматизировать расчет величин определяемых напряжений. К прибору прилагается методика выполнения измерений (МВИ) осевых и окружных напряжений в стальных трубопроводах, аттестованная в установленном порядке и внесенная в Федеральный Реестр МВИ, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора [1].

Одной из актуальных задач неразрушающего контроля является проблема оценки напряжений в металлоконструкциях. Знание реальных величин действующих напряжений необходимо для решения целого ряда задач, связанных с оценкой сроков дальнейшей безопасной эксплуатации опасных производственных объектов. Вот неполный перечень таких задач:

- Контроль изменения нагрузок в процессе испытаний и ремонтных работ.
- Оценка величины остаточных напряжений, возникающих при технологической обработке металла, в том числе при сварке.
- Выявление превышения напряжениями допустимых величин.
- Определение напряжений, возникающих при монтаже и эксплуатации крупногабаритных конструкций.
- Проверка правильности результатов прочностных расчетов.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) эксплуатируемого газопровода может значительно отличаться от рассчитанного при проектировании. На остаточные напряжения, имеющиеся в трубе вследствие технологии ее изготовления, накладываются монтажные напряжения, возникающие при строительстве трубопроводов, а также напряжения, связанные с рабочими нагрузками и другими факторами при эксплуатации

трубопровода. Не всегда можно достоверно определить степень влияния каждого из указанных факторов на НДС действующего трубопровода. Поэтому весьма актуальна задача прямого измерения величин напряжений (деформаций) в материале труб.

В настоящее время есть понимание того уже почти очевидного факта, что «решение вопросов оценки, контроля, формирования НДС при изготовлении труб и строительстве... может дать мощные рычаги в деле повышения надежности, ресурса и их безопасности» [1]. Ряд таких вопросов можно решить с помощью современных методов неразрушающего контроля НДС металла труб. Среди методов неразрушающего контроля механических напряжений особое место занимает метод акустоупругости. Его основой является упругоакустический эффект, то есть линейная зависимость скоростей упругих волн от механических напряжений. Коэффициенты этой зависимости строго определяет нелинейная теория упругости твердого тела.

Акустоупругость как способ измерения напряжений – это «механика без посредников». Все этапы измерения и расчета проводятся в рамках нелинейной механики, без привлечения полей и волн другой природы: упругие волны – это, по существу, высокочастотные механические колебания, распространяющиеся в твердых телах. Для измерения времени распространения упругих волн (их задержки в материале), по которому судят об изменении скорости, применяется многократно проверенный в более простых задачах (дефектоскопия, толщинометрия) ультразвуковой эхоимпульсный метод. Однако, для выявления изменений скоростей упругих волн, не превышающих 1 % даже при напряжениях, достигающих предела текучести трубных сталей, точность обычного эхо-метода повышена в несколько раз. Достижение такой точности можно представить себе как рассматривание эхоимпульсов «в многократную лупу» или как измерение расстояния от Земли до Луны с точностью до нескольких метров [1].

Главными для определения напряжений являются сдвиговые волны, в которых «частицы» твердой среды колеблются в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны. Они более информативны с точки зрения исследования твердых сред: направление упругих колебаний (поляризация волны) может быть вдоль одной или другой компоненты напряжения при одном и том же направлении распространения волны.

Определение изменения скорости волн при изменении напряжений (деформаций) в материале напоминает игру Алисы в крикет, когда перемещаются и игроки, и воротца: изменение скорости «складывается» из изменений времени и длины пробега волны («акустического пути»). Для учета изменения акустического пути при изменении напряжений дополнительно используются продольные волны [1], аналогичные обычным звуковым волнам с увеличенной в тысячу и более раз частотой.

Все три волны распространяются в направлении, перпендикулярном плоскости действия напряжений (прозвучивание вдоль толщины материала, то есть по нормали к поверхности трубы).

Метод акустоупругости позволяет проводить измерения величин как одноосных, так и двухосных напряжений с высокой точностью, то есть количественно определять плоское (в точке контроля) напряженное состояние конструкционного материала независимо от наличия у него ферромагнитных или каких либо иных, кроме упругих, физико-механических свойств. Последний факт становится весьма актуальным с учетом обсуждаемых в настоящее время перспектив замены стальных труб на алюминиевые [1].

Определение плоского напряженного состояния весьма актуально при контроле тонкостенных металлоконструкций, работающих под давлением: магистральные и технологические трубопроводы, сосуды давления и т.п. Немаловажное значение имеет и то, что в промежутке между измерениями датчики могут быть удалены с поверхности объекта контроля. В отдельных

задачах метод акустоупругости позволяет оценивать действующие напряжения при неизвестных значениях начальных акустических параметров в точке измерения (т.н. «безнулевая» акустическая тензометрия).

Для реализации указанных возможностей метода акустоупругости ООО «ИНКОТЕС» разрабатывает, проверяет в лабораторных и полевых условиях и модернизирует ультразвуковые приборы, позволяющие определять механические напряжения на основе прецизионных акустических измерений. Новейшая разработка в этой области - прибор ИН-5101А, обеспечивающий измерения одно- и двухосных напряжений растяжения-сжатия в конструкционных материалах и элементах конструкций, в том числе длительно эксплуатируемых при различных силовых и климатических воздействиях.

Возможности прибора подтверждены сертификатом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. К прибору прилагается методика выполнения измерений (МВИ) осевых и окружных напряжений в стальных трубопроводах, разработанная на основе многочисленных практических исследований возможности применения акустоупругого эффекта для определения напряжений в реальных конструкциях. Методика аттестована в установленном порядке и внесена в Федеральный Реестр МВИ, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора. Программное обеспечение прибора позволяет проводить акустические измерения с высокой точностью и автоматизировать расчет величин определяемых напряжений.

Прибор ИН-5101А и методика измерений обеспечивают измерения механических напряжений в диапазоне (предел текучести материала с погрешностью, для конструкционных сталей) оцениваемой следующим образом: 30 МПа в режиме акустической тензометрии); 30 % от предела текучести материала в режиме «безнулевой» акустической тензометрии (проведение измерений «in situ», в уже напряженной конструкции) [1].

Надо сказать, что последний режим измерения напряжений фактически недоступен для многих других методов НК. Кроме того, следует заметить, что для бесшовных и ряда прямошовных труб погрешность измерений в указанном режиме может быть значительно уменьшена.

3.3 Использование эффекта акустоупругости при решении задач исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов

Показано значение прямых измерений механических напряжений при исследовании напряженно-деформированного состояния трубопроводов обвязок основного оборудования компрессорных станций. Рассмотрены особенности применения метода акустоупругости для измерения напряжений в указанных объектах, а также перспективы применения метода для решения задач оптимизации напряженного состояния трубопроводных систем. Приведен пример использования метода акустоупругости в режиме «безнулевой» тензометрии для корректировки граничных условий при прочностных расчетах технологических трубопроводов [1].

Одной из важнейших задач при определении возможности и условий дальнейшей эксплуатации трубопроводных обвязок основного оборудования газоперекачивающих компрессорных станций (ТПО КС) является исследование и оценка их напряженно-деформированного состояния (НДС).

Указанные объекты представляют собой тонкостенные металлоконструкции внутренним диаметром от 500 до 1200 мм, изготовленные из низкоуглеродистых конструкционных сталей и работающие под внутренним давлением 3 – 8 МПа.

Данные нагрузки не учитываются проектом и, как показывает практика расчетов, порой даже не очень значительные смещения от проектного положения (на 4 – 10 мм) могут привести к превышению напряжениями предельно допустимых значений. Это, в свою очередь, даже при исчерпании

материалом способности к пластической деформации, ведет к увеличению риска зарождения и развития в зонах действия повышенных напряжений опасных трещиноподобных дефектов.

Таким образом, адекватное определение напряженно-деформированного состояния ТПО необходимо как для своевременного определения комплекса мер, направленных на снижение непроектных нагрузок до допустимого минимума, так и для оптимизации технологии неразрушающего контроля металла обвязки. Последнее обусловлено тем, что ввиду достаточно больших линейных размеров контролируемого объекта, проведение 100 % объема контроля основного металла и сварных швов обвязки является чрезвычайно трудоемким процессом. Выделение расчетным методом зон действия повышенных напряжений дает возможность при проведении неразрушающего контроля уделить особое внимание наиболее опасным участкам, где наиболее высокими являются как вероятность появления развивающихся дефектов, так и скорость их перехода в неустойчивое состояние, соответствующее катастрофическому разрушению.

Другой важной задачей, для решения которой необходимо знание НДС, является расчет остаточного ресурса трубопроводов обвязки. Очевидно, что представление об истинной картине распределения механических напряжений может существенно скорректировать прогнозы о сроках достижения предельного состояния элементов обвязки [1].

Однако, адекватная оценка НДС трубопроводной обвязки затруднена рядом факторов, обусловленных особенностями проведения геодезической съемки ТПО КС: как правило, отсутствуют результаты геодезической съемки ТПО КС в исходном проектном положении; при монтаже обвязки иногда допускаются уклоны горизонтальных участков и разновысотность элементов обвязки между врезками крановых узлов, то есть те признаки, по которым и оценивается степень кинематического нагружения; геодезическая съемка рассматривает преимущественно вертикальные смещения; смещения, даже в

пределах погрешности измерения геодезическими приборами, могут иногда приводить к значительному кинематическому нагружению ТПО [1].

Кроме перечисленных факторов, дополнительную сложность представляет оценка взаимодействия обвязки с опорами. Опора может прилегать к трубе, как полностью, так и неполно; в свою очередь, при полном прилегании возможно как проектное положение, так и выпирание опоры. Все отклонения от проектного положения трубы обвязки относительно опоры также могут приводить к значительному изменению напряженно-деформированного состояния ТПО. Из вышесказанного следует, что только по результатам геодезии и визуального осмотра невозможно определить адекватные граничные условия для выполнения прочностного расчета ТПО. Необходимы дополнительные методы, которые позволили бы проводить проверку граничных условий, закладываемых в схемы расчета механических напряжений [1].

В этой ситуации, по-видимому, нет альтернативы методам прямого измерения напряжений. Одним из них является метод акустоупругости, основанный на зависимости скоростей распространения ультразвуковых колебаний от действующих механических напряжений [1,5]. Указанный метод позволяет измерять как продольную (s_1 – вдоль образующей трубы), так и поперечную (s_2 – вдоль направляющей) компоненту поля механических напряжений в трубопроводах в плоскости, перпендикулярной нормали к поверхности трубы.

Обвязка какой-либо группы из технологических объектов КС (аппараты воздушного охлаждения газа (АВО), пылеуловители (ПУ) или газоперекачивающие агрегаты (ГПА)) представляет собой подземный коллектор, от которого отходят ответвления - как правило, симметричные - к каждому из объектов группы. Именно в них чаще всего и производятся измерения напряжений. Технология применения данного метода определяется следующими факторами: высокое качество подготовки поверхности (степень

чистоты около Rz 40) в точках проведения измерений; трубы обвязки изготовлены из проката, что обуславливает возможность наличия довольно значительной исходной акустической анизотропии (более 2 %), которая существенно влияет на точность измерений; при кинематическом нагружении обвязки изменяются, как правило, осевые (s_z), а не кольцевые (s_t) напряжения;

В соответствии с перечисленными условиями, измерение напряжений может проводиться только на ограниченном числе специально подготовленных точек поверхности трубы. Измерение возможно лишь в режиме «безнулевой» акустической тензометрии, которое, в свою очередь, требует наличия образца-эталоны с исходной «нулевой» анизотропией. Погрешность измерения при этом будет определяться как разбросом исходных акустических характеристик металла трубы, так и отличием ее исходной акустической анизотропии от анизотропии образца, и может составить значительную величину, даже превышающую предел текучести материала [1].

При отсутствии образца-эталоны желательно в качестве непосредственно измеряемой величины выбирать разность значений осевых напряжений в противоположных точках (симметрично расположенных на верхней и нижней образующих трубы).

Таким образом, можно сделать вывод, что существующая технология не позволяет проводить оценку НДС только путем измерения напряжений на основе сравнения с эталоном. Подобный процесс был бы в любом случае чрезвычайно трудоемок, а в случае высокой акустической анизотропии контролируемого материала практически невозможен. Исходя из вышесказанного, наиболее оптимальной представляется следующая схема применения метода акустоупругости для прямых измерений напряжений в ТПО КС:

Производится изучение акустической анизотропии образца-эталоны. В нескольких точках по направляющей производятся измерения задержек всех типов волн и определяются значения акустической анизотропии в каждой из

этих точек. При этом определяется ожидаемая погрешность измерения. При отсутствии образца-эталоны эти измерения можно провести на таком участке обвязки, на котором маловероятно появление значительных изгибных напряжений [1].

Следующим шагом должны быть предварительные расчеты напряжений, как для проектных условий (проектный расчет), так и с граничными условиями, полученными на основе сравнения данных геодезических измерений с исходными значениями или с проектным положением (расчет кинематических нагрузок).

На основе последнего расчета определяются такие точки (или пары точек), в которых разница между проектными и кинематическими нагрузками будет максимальной и превысит погрешность измерения. Именно эти точки должны выбираться в качестве точек измерения. Для повышения точности измерений желательно выбирать не менее двух точек (или пар точек) на каждом из ответвлений. В выбранных точках измеряются значения напряжений [15].

Полученные значения сравниваются с результатами проектного расчета и расчета кинематических нагрузок. При этом, чтобы отсеять возможные «грубые промахи» при измерении, следует обратить внимание не только на соответствие результатов в каждой отдельной точке, но и на общее соответствие измеренных напряжений характеру нагружения во всех точках соответствующего ответвления.

По результатам сравнения может быть принято три возможных решения: измеренные значения соответствуют проектным нагрузкам, отклонения от проектного положения, если они обнаружены, вызваны не смещениями элементов обвязки, а особенностями монтажа; измеренные значения соответствуют кинематическому нагружению, согласно принятым граничным условиям; измеренные значения напряжений свидетельствуют о том, что кинематическое нагружение имеет место, но его характер отличается

от предполагаемого. В этом случае необходима корректировка граничных условий расчетов, с учетом результатов прямых измерений напряжений [1].

Следует отметить, что аномально высокие значения акустической анизотропии, указывают на то, что металл в этих точках претерпел значительную пластическую деформацию. Таким образом, метод акустоупругости позволяет не только измерить напряжения в упругой области, но и зафиксировать факт наличия пластической деформации в точке измерения. Если в результате комплексного анализа на основе прочностных расчетов установлен факт наличия кинематического нагружения, то по результатам окончательного прочностного расчета определяются объем и методы неразрушающего контроля в зонах действия недопустимых напряжений и пластических деформаций, а также мероприятия по снижению кинематических нагрузок [1].

Обеспечивать безопасность труда необходимо прежде всего по гуманистическим соображениям, в целях сохранения жизни и здоровья работающих людей. Однако надо учитывать и экономические последствия состояния безопасности и материальные затраты на управление ею.

Повышение уровня безопасности вызывает сокращение числа аварий, травм и заболеваний, снижает затраты, связанные с этими явлениями, уменьшает выплаты и компенсации за работу в неблагоприятных условиях труда, уменьшает потери рабочего времени и текучесть кадров, увеличивает производительность труда на предприятии. При рыночных отношениях одним из решающих аспектов становятся экономические методы и средства управления производством.

Итак, одно из необходимых условий управления охраной труда - оценка эффективности проводимых мероприятий. Эффективность мероприятий может выражаться инженерно-техническими, социальными, социально-экономическими и экономическими показателями.

Об инженерно-технической эффективности мероприятий судят по разности соответствующих показателей, характеризующих условия безопасности до и после реализации мероприятий.

Социальные последствия внедрения мероприятия по охране труда определяются разностью величин до и после осуществления мероприятий по следующим показателям: увеличению численности работающих, для которых условия труда соответствуют нормативным требованиям; снижению травматизма и заболеваемости, сокращению текучести кадров из-за неудовлетворительных условий труда, уменьшению вероятности аварий и ЧС и др.

Экономическая эффективность внедрения мероприятий по улучшению условий труда выражается в снижении затрат труда, уменьшении затрат, связанных с компенсацией утраченного работниками здоровья, в изменении налоговых выплат и проявляется в конечном счете в повышении экономической эффективности производства.

Расчет экономической эффективности производится путем сопоставления существующих экономических последствий неблагоприятных условий труда до внедрения мероприятий с фактическими затратами, установленными после осуществления мероприятий.

4.1 Определение затрат на реализацию мероприятий

Затраты на реализацию мероприятий по охране труда подразделяются на капитальные и эксплуатационные.

К капитальным вложениям относятся единовременные затраты на создание основных фондов, относящихся к охране труда, и на совершенствование техники и технологии, повышающей безопасность труда.

К эксплуатационным расходам относятся текущие затраты на совершенствование безопасности основного технологического оборудования и затраты на поддержание проведенных мероприятий по охране труда в состоянии, способном поддерживать и повышать безопасность труда за счет цеховых и общезаводских расходов.

Затраты на реализацию мероприятия определяются по следующей формуле:

$$Z_m = Z_{\text{наук}} + Z_{\text{п}} + Z_{\text{и}} + Z_{\text{л}} \quad (1)$$

где — затраты на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, руб. (включают единовременные затраты на проектирование, разработку мероприятий);

– затраты при производстве мероприятия (включают единовременные затраты на приобретение или изготовление проектируемых систем, доставку, а также на их монтаж);

– затраты при использовании мероприятия;

– затраты при ликвидации мероприятия (расходы, связанные с утилизацией, ликвидацией или реконструкцией внедренного мероприятия, когда срок полезного использования объекта закончился).

В предыдущей главе были предложены следующие мероприятия для повышения уровня безопасности на рабочих местах ЗАО «Нижевартонскбурремсервис» Таким образом, $Z_m = 2809887$ рублей.

Таким образом, $Z_m = 2809887$ рублей.

4.2 Определение результатов от использования разработанных мероприятий

Экономические результаты от использования мероприятия по улучшению условий труда могут быть обнаружены как сразу после его реализации, так и через определенный период времени. Поэтому возникает необходимость определения результатов от внедрения мероприятий за период его полезного использования.

С учетом всех вышеперечисленных элементов годовая экономия (E_z от уменьшения издержек производства при использовании мероприятий по охране труда определяется по формуле

$$E_z = \sum E_i \quad (2)$$

где i – затраты производства, по которым, в результате внедрения мероприятия по улучшению условий труда, происходит экономия.

В данном примере формула (2) принимает вид:

$$E_z = E_v + E_{vnn} + E_{bn} + E_{tk} + E_{tpz} + E_{л} + E_{ав} + E_{вчс} + E_{неаб} + E_{vз} + E_{стп} \quad (3)$$

где \mathcal{E}_v – экономия от снижения трудоемкости и увеличения объема производства, руб.;

$\mathcal{E}_{упр}$ – экономия на условно-постоянных расходах при увеличении объема производства;

$\mathcal{E}_{бр}$ – экономия от снижения процента выпуска брака, руб.;

$\mathcal{E}_{тк}$ – уменьшение ущерба, причиняемого текучестью кадров;

$\mathcal{E}_{тпз}$ – сокращение материального ущерба от профессиональных заболеваний и травматизма;

$\mathcal{E}_л$ – экономия за счет сокращения льгот и компенсаций;

$\mathcal{E}_{ав}$ – экономия потери прибыли от простоя объекта по причине НС, аварии и чрезвычайных ситуаций;

$\mathcal{E}_{вчс}$ – экономия расходов, связанных с восстановлением объектов после аварии и ЧС;

$\mathcal{E}_{реаб}$ – экономия расходов на медицинскую, социальную и профессиональную реабилитацию пострадавших на производстве;

$\mathcal{E}_{уз}$ – экономия расходов на компенсацию работникам утраченного здоровья;

$\mathcal{E}_{стр}$ – экономия от уменьшения страховых выплат на обязательные отчисления от несчастных случаев и профессиональных заболеваний.

Все ожидаемые экономические последствия удобно определять с отражением результатов до и после внедрения мероприятия с последующим их сравнением.

Рассмотрим определение некоторых составляющих издержек производства, которые могут измениться при использовании мероприятий по охране труда.

Снижение трудоемкости означает рост производительности труда.

За счет снижения потерь рабочего времени на рабочих местах рабочих, получивших новое оборудование, прирост объема производства составит:

$$V = \frac{\Delta P}{\Delta}$$

$$\Delta_{\text{н.р.}} = (B2 - B1) \cdot F \cdot Ч \cdot П$$

где Δ – рост объемов производства,
 F – годовая экономия рабочего времени после внедрения мероприятия, час/год ,

$B1, B2$ – потери рабочего времени до и после внедрения мероприятия, час ,

Δ – годовой фонд рабочего времени, дней,

$Ч$ – численность рабочих, чел.,

$П$ – дневная производительность труда (8час), дет./день,

$$\Delta_{\text{н.р.}} = (0,0056 - 0,0014) \cdot 260 \cdot 8 \cdot 360 = 3130 \text{ час/год}$$

$$V = \frac{\Delta_{\text{н.р.}}}{\Delta} = 140850 \text{ дет/год}$$

Таким образом, дневная производительность труда станет больше на 68 деталей и составит 428 дет/день.

Экономия от снижения трудоемкости составит:

$$\Delta_{\text{ст}} = C \cdot V,$$

где C – себестоимость 1 детали, руб.

$$\Delta_{\text{ст}} = 20 \cdot 140850 = 2817000 \text{ руб}$$

Исходя из рентабельности работы предприятия, которая составляет порядка 30 %, ожидаемый экономический эффект за счет планируемого роста прибыли определяется как:

$$\Delta_V = V \cdot R$$

где V – прирост объемов производства;

R – рентабельность производства.

$$\Delta_V = 2817000 \cdot 0,30 = 845095 \text{ руб}$$

Изменение веса условно-постоянных расходов имеет место при увеличении выпуска продукции. Если внедрение мероприятия по охране труда

обеспечивает увеличение объема производства, то годовая экономия произойдет на условно-постоянных расходах.

При определении прироста объема производства в натуральном выражении (ΔV) экономия на условно-постоянных расходах рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{\text{впн}} = \frac{\Delta V}{V} \cdot P_{\text{впн}} \cdot 100 \quad ()$$

где ΔV – объем выпуска продукции в расчетном периоде в натуральном выражении;

$P_{\text{впн}}$ – полная себестоимость товарной продукции, руб.;

ΔV – удельный вес условно-постоянных расходов в себестоимости продукции, %.

$$\Delta_{\text{впн}} = \frac{281700}{100} \cdot 10 = 281700$$

$$\Delta_{\text{впн}} = 281700 \text{ руб}$$

Экономия за счет уменьшения ущерба, связанного с выпуском брака определяется по формуле

$$\Delta_{\text{бн}} = C \cdot \lambda$$

где C – цена единицы продукции, руб./шт;

λ – ожидаемое или фактически полученное снижение количества бракованной продукции в расчетный период, в натуральном выражении (шт).

$$\Delta_{\text{бн}} = 20 \cdot 16640 = 332800 \text{ руб}$$

Экономия за счет уменьшения ущерба, причиняемого текучестью кадров, можно определить по следующей формуле

$$\Delta_{\text{тк}} = \Delta_{\text{тк в}} + \Delta_{\text{тк в п}} + \Delta_{\text{тк п в п}} + \Delta_{\text{тк п п}}$$

где $\Delta_{\text{тк в}}$ – экономия, связанная с потерей выработки увольняющихся из-за неблагоприятных условий труда, руб.;

$\Delta_{\text{тк в п}}$ – экономия, связанная с потерями от неполной выработки вновь принятых рабочих;

$\Delta_{\text{тк п в п}}$ – изменение расходов на подготовку и переподготовку вновь принятых работников;

– изменение расходов, связанные с перерывами в работе с момента увольнения до принятия новых работников.

$$\mathcal{E}_{\text{тк}} = 264000 + 288000 + 38000 + 286200 = 876200 \text{ руб}$$

$$\mathcal{E}_{\text{тк}} = 876200 \text{ руб}$$

Расходы, связанные с материальным ущербом от профессиональных заболеваний, травматизма и общей заболеваемости учитываются каждым предприятием на основании отчетных данных за расчетный период и предполагаемого или фактического снижения дней нетрудоспособности. В общем виде расчет ведется по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{пз. тп. оз}} = D_{\text{ф}} \cdot Y_{\text{сн}}$$

где – ожидаемое или фактическое снижение дней нетрудоспособности по причинам травматизма, профессиональных заболеваний или общей заболеваемости, дни;

– среднедневной размер ущерба, причиняемого предприятию одним случаем травматизма, профессиональной заболеваемости рабочих или общей заболеваемостью соответственно, руб.

В тех случаях, когда учитывается суммарно среднегодовой размер ущерба предприятия от травматизма и профзаболеваемости, расчет ведется по формуле

$$Y_{\text{сн}} = \frac{\text{---}}{\text{---}}$$

где Y – ущерб, причиняемый предприятию профзаболеваниями, травматизмом за расчетный период, руб;

$D_{\text{ф}}$ – количество дней нетрудоспособности по причинам травматизма и профзаболеваний за расчетный период.

Величина Y обычно подсчитывается прямым путем по сумме расходов и потерь.

$$Y_{\text{сн}} = \frac{\text{---}}{\text{---}} = 3508 \text{ руб}$$

$$\mathcal{E}_{\text{пз. тп. оз}} = 150 \cdot 3508 = 526200 \text{ руб}$$

Экономия денежных средств предприятия в результате сокращения численности рабочих, пользующихся тем или иным видом льгот и компенсаций за работу в неблагоприятных условиях труда, а также в результате изменения расходов на их выплаты определяется следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{л}} = \mathcal{E}_{\text{сл}} + \mathcal{E}_{\text{ло}} + \mathcal{E}_{\text{тн}} + \mathcal{E}_{\text{лп}} + \mathcal{E}_{\text{сп}}$$

где $\mathcal{E}_{\text{сл}}$ – изменение расходов, связанные с предоставлением работникам сокращенного рабочего дня, руб.;

$\mathcal{E}_{\text{ло}}$ – изменение расходов на дополнительный отпуск работникам, работающим в неблагоприятных условиях труда;

$\mathcal{E}_{\text{тн}}$ – изменение тарифных надбавок к заработной плате за работу в неблагоприятных условиях труда;

$\mathcal{E}_{\text{лп}}$ и $\mathcal{E}_{\text{сп}}$ – изменение расходов на предоставление лечебно-профилактического и спецпитания.

$$\mathcal{E}_{\text{л}} = 364020 + 108800 + 261120 + 28800 = 762740 \text{ руб}$$

Экономия потери прибыли от простоя объекта по причине НС, аварии и чрезвычайных ситуаций. Значение предотвращенных потерь определяют по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{яв}} = \Pi_1 - \Pi_2$$

где $\mathcal{E}_{\text{яв}}$ – экономические потери от простоя объекта по причине НС, аварии и чрезвычайных ситуаций соответственно до и после реализации мероприятий по обеспечению безопасности, руб.

$$\mathcal{E}_{\text{яв}} = 160060 - 23600 = 136460 \text{ руб}$$

Расходы, связанные с восстановлением объектов после аварии и ЧС включают издержки при восстановительных работах, руб., единовременные дополнительные вложения, руб.

$$\mathcal{E}_{\text{вчс}} = \underline{150000 \text{ руб.}}$$

Экономия расходов на медицинскую, социальную и профессиональную реабилитацию пострадавших на производстве происходит за счет экономии расходов на клиническое лечение пострадавших $S_{\text{кл}}$, расходов на санаторно-

курортное лечение пострадавших $S_{с.к.п.}$, на профессиональную переподготовку $S_{пр.п.}$.

$$S_{к.п. i} = \sum (S_{л.} + S_{б.} \cdot T_{б.})$$

где – средняя стоимость доставки одного пострадавшего в больницу, руб.;

– средние расходы больницы на одного пострадавшего, руб.дни⁻¹;

– период нахождения в больнице i- го пострадавшего, дни;

– количество травмированных, прошедших клиническое лечение, чел.

$$S_{к.п.} = (100 + 800 \cdot 62) \cdot 4 = 198800 \text{ руб}$$

Расходы на санаторно-курортное лечение пострадавших вычисляют по формуле:

$$S_{с.к.п. i} = \sum (S_{п.с. i} + S_{с. i})$$

где – средние расходы на проезд в санаторий z-го пострадавшего, руб.;

– средние расходы санатория на i-го пострадавшего, руб.;

– количество травмированных, прошедших курс лечения в санатории,

чел.

$$S_{с.к.п.} = (100 + 45000) \cdot 1 = 45100 \text{ руб}$$

Расходы на профессиональную переподготовку $S_{пр.п.}$ включают в себя обучение, переквалификацию, в связи с невозможностью выполнять прежние трудовые функции.

$$S_{пр.п.} = 30000 \text{ руб.}$$

$$Э_{неаб} = S_{к.п.} + S_{с.к.п.} + S_{пр.п.} = 273800 \text{ руб}$$

Экономия расходов на компенсацию работникам утраченного здоровья будет получаться в результате исключения выплат пенсий инвалидам, пострадавшим на производстве.

$$Э_{вз} = W_{ии} \cdot \sigma_{н} \cdot T_{ии}$$

где – значение i-й пенсии инвалидам 1-й группы, руб.дни⁻¹;

– количество травмированных, получивших инвалидность, чел.;

– период выплаты i -й пенсии (пособия) по инвалидности, дни.

$$\mathcal{E}_{vз} = 15000 \cdot 1 \cdot 12 = 180000 \text{ руб}$$

С вступлением в силу Федерального закона, защиту интересов пострадавшего работника осуществляет страховщик, в качестве которого выступает Фонд социального страхования Российской Федерации [16]. Пособие по временной нетрудоспособности за счет работодателя оплачивается только за первые два дня нетрудоспособности.

Расходы на компенсацию работникам утраченного здоровья . несет страховщик.

Скидки к страховым тарифам на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний устанавливаются Фондом социального страхования на текущий календарный год. Скидки могут быть установлены в размере не более 40% страхового тарифа.

Возможность получения скидок может быть определена исходя из уменьшения (отсутствия) страховых случаев за предшествующий календарный год.

Экономия от уменьшения страховых выплат на обязательные отчисления от несчастных случаев и профессиональных заболеваний:

$$\mathcal{E},$$

где – сумма начисленных страховых взносов до и после реализации мероприятий по повышению уровня безопасности с учетом скидки

$$\mathcal{E}_{стп} = 2400000 - 2208000 = 192000 \text{ руб}$$

Таким образом, годовая экономия составит

$$\mathcal{E}_r = \mathcal{E}_V + \mathcal{E}_{vпн} + \mathcal{E}_{бп} + \mathcal{E}_{тк} + \mathcal{E}_{тпз} + \mathcal{E}_л + \mathcal{E}_{яв} + \mathcal{E}_{вчс} + \mathcal{E}_{неаб} + \mathcal{E}_{vз} + \mathcal{E}_{стп}$$

$$\mathcal{E}_r = 4557057 \text{ руб}$$

4.3 Расчет технико-экономических показателей

Экономический ущерб, причиняемый обществу от неудовлетворительных условий труда и различных видов нетрудоспособности, рассматривается как совокупность материальных расходов и потерь предприятия (народного хозяйства).

Экономический эффект мероприятий по улучшению условий труда отражает собой превышение стоимостных оценок конечных результатов над совокупными затратами ресурсов (трудовых, материальных, капитальных и др.) за расчетный период.

В число возможных вариантов реализации мероприятия на этапе технико-экономического обоснования отбираются те, которые отвечают ограничениям технического и социального характера. Выбор лучшего варианта мероприятий по улучшению условий труда производится с использованием следующих показателей:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД) или интегральный эффект;
- индекс доходности (ИД) или индекс прибыльности;
- срок окупаемости.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) определяется как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному году, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами.

Если в течение расчетного периода не происходит инфляционного изменения цен или расчет производится в базовых ценах, то величина ЧДД для постоянной нормы дисконта вычисляется по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum (R_t - Z_t) \cdot \sigma_t$$

где R_t – результаты, достигаемые в i -ом году расчета;

Z_t – затраты, осуществляемые в том же году;

σ_t – коэффициент дисконтирования;

t – год начала разработки мероприятия;

T – горизонт расчета (равный номеру года расчета, на котором производится ликвидация мероприятия).

$$\text{ЧДД} = (4557057 - 2809887) \cdot 0,15 = 262075 \text{ руб}$$

Если ЧДД внедряемого мероприятия положителен, мероприятие является эффективным.

Индекс доходности (ИД) представляет собой отношение суммы приведенных эффектов к величине капиталовложений.

Индекс доходности тесно связан с ЧДД. Он строится из тех же элементов и его значение связано со значением ЧДД: если ЧДД положителен, то $\text{ИД} > 1$ и наоборот. Если $\text{ИД} > 1$, то предлагаемое мероприятие экономически эффективно.

$$\text{ИД} = \frac{262075}{174716} = 1,5$$

Срок окупаемости – период (измеряемый в месяцах, кварталах или годах), начиная с которого первоначальные вложения и другие затраты, связанные с предлагаемым мероприятием, покрываются суммарным результатами его реализации.

Его фактическую величину сравнивают с нормативной ($T_{\text{норм}}$), равной 6,7 года:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{(1 + r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{(1 + r)^i}}$$

K_1 – капиталовложения до внедрения мероприятий,

K_2 – капиталовложения после внедрения мероприятий,

– затраты на внедрение мероприятий.

$$T = \frac{2809887}{1814000} = 1,55 \text{ года}$$

Срок окупаемости 1 год 7 мес.

Не стоит забывать, что кроме экономического эффекта при внедрении мероприятий по повышению уровня безопасности может быть достигнут социальный, экологический, материальный и другие виды эффектов.

Социальный эффект показывает соответствие фактического состояния условий труда установленному социальному нормативу. Социальные

последствия внедрения мероприятий по охране труда могут быть представлены разностью величин до и после осуществления мероприятий по соответствующим показателям. Кроме того, при дальнейшем использовании мероприятий по улучшению условий труда, социальный эффект обязательно даст экономический, т.к. от условий труда зависят такие показатели экономической эффективности, как производительность труда, уровень текучести кадров, простой вследствие несчастного случая или аварии по причинам неблагоприятных условий труда, высокий уровень производственного травматизма и профзаболеваний по причине низкого уровня организации работ по охране труда и др.

Таблица 5 – Техничко-экономические показатели мероприятий по повышению уровня безопасности на рабочих местах

Показатели	Единицы измерения	Значения показателей
Увеличения объема производства	шт.	140850
Экономия от снижения трудоемкости	тыс. руб.	845,10
Экономия на условно-постоянных расходах	тыс. руб.	281,70
Экономия материальных потерь от выпуска брака	тыс. руб.	332,80
Экономия за счет уменьшения текучести кадров	тыс. руб.	876,20
Экономия за счет уменьшения ущерба от профессиональных заболеваний и травматизма	тыс. руб.	526,20
Экономия за счет сокращения льгот и компенсаций	тыс. руб.	762,74
Экономия потери прибыли от простоя объекта по причине НС, аварии и чрезвычайных ситуаций	тыс. руб.	136,460
Экономия расходов, связанных с восстановлением объектов после аварии и ЧС	тыс. руб.	150,00
Экономия расходов на медицинскую, социальную и профессиональную реабилитацию пострадавших на производстве	тыс. руб.	273,80
Экономия расходов на компенсацию работникам утраченного здоровья	тыс. руб.	180,00

Экономия от уменьшения страховых выплат на обязательные отчисления от несчастных случаев и профессиональных заболеваний	тыс. руб.	192,00
Сумма всех экономических результатов	тыс. руб.	4557,06
Капитальные единовременные затраты	тыс. руб.	2809,90
Чистый дисконтируемый доход	тыс. руб.	262,10
Индекс доходности		1,5
Срок окупаемости	год	1,55

Вывод: обеспечение безопасности на рабочих местах – затратное мероприятие, но человеческая жизнь и здоровье являются объектом сохранения «номер один» согласно политике Общества в области охраны труда.

Расчет предложенных мероприятий и оценка их с экономической точки зрения, подсчет срока окупаемости позволяют сделать вывод, что мероприятия применимы на производстве и эффективны.

5 Социальная ответственность

5.1 Характеристика объекта исследования

В лаборатории производится исследования напряженно-деформированного состояния уменьшенной модели строительной фермы. При исследовании фермы на наличия напряжений осуществляются следующие операции: зачистка контролируемых площадок, установка ультразвуковых датчиков, настройка датчиков, обработка информации с помощью ультразвукового комплекса ИН-5101 А.

Лаборатория имеет площадь равную 54 м². Лаборатория находится в учебном здании, имеет четыре капитальных стен. Количество дверей – 3, один из них эвакуационный выход. Количество оконных проемов – 2. Окраска стен – светло-голубая. Количество светильников – 18. Количество розеток 220в – 3. Включателей света – 2. Лаборатория оборудована пожарной сигнализацией и имеет дымовые оптические извещатели – 2шт, ручной пожарный извещатель – 1шт, огнетушитель – 1шт. Также в лаборатории установлено заземление в виде металлической пластины шириной 40мм.

При исследовании экспериментальной фермы в лаборатории используется следующее оборудование:

- Ультразвуковой прибор ИН-5101А - 1 шт.
- Пьезоэлектрические датчики - 2 шт.

Ультразвуковой прибор ИН-5101А – состоит из ящика в котором находятся портативный персональный компьютер и микросхемы для преобразования цифрового сигнала в аналоговый для датчиков и считывания сигнала с датчиков преобразуя в цифровой.

Пьезоэлектрические датчики – предназначены для преобразования сигнала от ультразвукового прибора ИН-5101А в механические колебания

ультразвуковой волны и передачи ультразвуковой волны в исследуемый объект. Затем принимают отраженные механические колебания ультразвуковой волны и преобразуют в электрический сигнал.

Лаборатория находится на первом этаже учебного здания, освещение осуществляется двумя окнами, расположенными в стене здания, а также восемнадцатью светильниками расположенными на потолке помещения. Стены лаборатории выполнены из железобетонных блоков, обиты гипсокартонном и окрашены в светлые тона. Завоз исследуемых объектов в лабораторию и вывоз осуществляется через входную. Вход в лабораторию и выход осуществляется через входную дверь. На случай пожара лаборатория оснащена запасным выходом и системой противопожарной сигнализации.

5.2 Выявление и анализ вредных и опасных производственных факторов в данной лаборатории

При выполнении исследований на работника лаборатории могут воздействовать вредные и опасные производственные факторы: производственный шум; ультразвуковое излучение; электрический ток, локальная вибрация.

1. Производственный шум.

Источниками шума при лабораторных испытаниях являются:

- Портативный персональный компьютер;
- Блок питания компьютера;
- Блок питания ультразвукового компьютера;

Шумом принято называть любой нежелательный звук, воспринимаемый органом слуха человека. Он представляет собой беспорядочное сочетание звуков различной интенсивности и частоты.

Шум неблагоприятно воздействует на работающего: ослабляет внимание, увеличивает расход энергии при одинаковой физической нагрузке,

замедляет скорость психических реакций, в результате снижается производительность труда и ухудшается качество работы.

Нормируемые параметры шума: среднегеометрические частоты октавных полос: $63 \div 8000$ герц; допустимый уровень звукового давления: $74 \div 99$ децибел; допустимый эквивалентный уровень звука 85 децибел (СН 2.24/2.1.8.562-96).

По частоте звуковые колебания делятся на инфразвуковые (частота менее 20Гц), звуковые (от 20 до 20000Гц) и ультразвуковые (более 20000Гц) [20].

Шум, возникающий на участке, можно охарактеризовать как постоянный, широкополосный (являющий непрерывный спектр шириной более одной октавы) колеблющийся во времени.

Шум, на проектируемом участке сборки и сварки удлинителя, генерируемый в ходе работы сварочного оборудования, горения сварочной дуги и других вышеперечисленных причин, является среднечастотным (400-1000 Гц) и согласно ГОСТ 12.1.003-83 не превышает 80 - 85 дБ.

2. Ультразвуковое излучение.

Ультразвук обладает главным образом локальным действием на организм, поскольку передается при непосредственном контакте с ультразвуковым инструментом, обрабатываемыми деталями или средами, где возбуждаются ультразвуковые колебания. Источником ультразвука является производственное оборудование, в котором генерируется ультразвук для выполнения технологических процессов, контроля и измерений, и производственное оборудование, при эксплуатации которого ультразвук возникает как сопутствующий фактор, а также медицинское ультразвуковое оборудование. По частотному составу ультразвуковой диапазон следует подразделять на:

- низкочастотный от $1,12 \times 10^4$ до $1,0 \times 10^5$ Гц;
- высокочастотный от $1,0 \times 10^5$ до $1,0 \times 10^9$ Гц.

По способу распространения ультразвук следует подразделять на:

- распространяющийся воздушным путем (воздушный ультразвук);
- распространяющийся контактным путем при соприкосновении с твердыми и жидкими средами (контактный ультразвук).

Длительное систематическое воздействие ультразвука, распространяющегося воздушным путем, вызывает изменения нервной, сердечнососудистой и эндокринной систем, слухового и вестибулярного анализаторов. В поле ультразвуковых колебаний в живых тканях ультразвук оказывает механическое, термическое, физико-химическое воздействие.

Характеристикой воздушного ультразвука на рабочих местах являются уровни звукового давления в децибелах в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 12,5, 16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100 кГц.

Допустимые уровни звукового давления на рабочих местах не должны превышать значений, приведенных в таблица 6.1.

Таблица 6.1 – Допустимые уровни звукового давления на рабочих местах

Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, кГц	Уровень звукового давления, дБ
12,5	80
16	80 (90)
20	100
25	105
31,5-100,0	110

Характеристикой контактного ультразвука являются пиковые значения виброскорости L_v или ее логарифмические уровни в децибелах в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 8, 16, 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000, 31500 кГц, определяемые по формуле:

$$L_v = 201g \frac{H}{H_o}, \quad (6.1)$$

где n - пиковое значение виброскорости, м/с;

n_o - опорное значение виброскорости, равное 5×10^{-8} м/с.

Допустимые уровни виброскорости и ее пиковые значения на рабочих местах не должны превышать значений, приведенных в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Допустимые уровни виброскорости и ее пиковые значения на рабочих местах

Среднегеометрические частоты октавных полос, кГц	Пиковые значения виброскорости, м/с	Уровни виброскорости, дБ
8-63	5×10^{-3}	100
125-500	$8,9 \times 10^{-3}$	105
1×10^3 - $31,5 \times 10^3$	$1,6 \times 10^{-2}$	110

Допустимые уровни контактного ультразвука следует принимать на 5 дБ ниже значений, указанных в таблице 6.2, в тех случаях, когда работающие подвергаются совместному воздействию воздушного и контактного ультразвука.

В стандартах и (или) технических условиях на оборудование, излучающее воздушный ультразвук, должны быть установлены предельно допустимые значения ультразвуковой характеристики (далее - УЗХ).

Предельно допустимые значения УЗХ оборудования следует устанавливать, исходя из требования обеспечения на рабочих местах допустимых уровней ультразвука в соответствии с разд.2.

УЗХ оборудования являются уровни звуковой мощности в нормируемом диапазоне частот.

Для оборудования, звуковая мощность которого не может быть определена, а также для оборудования, которое укомплектовывается только на

предприятиях-потребителях, в качестве УЗХ допускается использовать уровни звукового давления в нормируемом диапазоне частот в контрольных точках. Число контрольных точек - не менее трех (включая рабочее место). Координаты точек должны быть указаны в нормативно-технической документации.

Ультразвуковое оборудование должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.051.

Запрещается непосредственный контакт работающих с рабочей поверхностью оборудования в процессе его обслуживания, жидкостью и обрабатываемыми деталями во время возбуждения в них ультразвука.

Для исключения контакта с источниками ультразвука необходимо применять:

- дистанционное управление оборудованием;
- автоблокировку, т.е. автоматическое отключение оборудования при выполнении вспомогательных операций (загрузке и выгрузке продукции, нанесении контактных смазок и т.д.);
- приспособления для удержания источника ультразвука или обрабатываемой детали.

Для защиты рук от возможного неблагоприятного воздействия контактного ультразвука в твердой или жидкой средах необходимо применять две пары перчаток - резиновые (наружные) и хлопчатобумажные (внутренние) или только хлопчатобумажные.

Для защиты работающих от неблагоприятного воздействия воздушного ультразвука следует применять противошумы по ГОСТ 12.4.051.

К работе с ультразвуковым оборудованием не допускаются лица моложе 18 лет.

Лица, подвергающиеся в процессе трудовой деятельности воздействию контактного ультразвука, подлежат предварительным при приеме на работу и периодическим медицинским осмотрам.

3. Электрический ток.

Действие электрического тока на организм носит разносторонний характер и оказывает термическое, электролитическое, биологическое воздействие на различные системы организма. Виды действия на организм: электротравмы и электроудары.

Электрические травмы – это местные поражения тела ожоги, металлизация кожи, механическое повреждение организма.

Для переменного тока частотой 50 герц допустимой величиной считается: при длительном воздействии 1 миллиампер; при воздействии 0,1 секунду – 500 миллиампер и 1,0 секунду – 65 миллиампер.

Род и частота тока также влияют на тяжесть поражения. Наиболее опасным является ток частотой 50 герц.

При постоянном токе пороговые значения повышаются: для ощутимого тока до $6 \div 7$ миллиампер и не отпускающего тока до $50 \div 70$ миллиампер.

В данной лаборатории используется различное оборудование. Его работа осуществляется при подключении к сети переменного тока с напряжением 220В.

Основные причины несчастных случаев от воздействия электрического тока следующие:

- Случайное прикосновение или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям, находящимся под напряжением.
- Появление напряжения на конструктивных металлических частях электрооборудования – корпусах, кожухах и т. п. – в результате повреждения изоляции и других причин.
- Появление напряжения на отключенных токоведущих частях, на которых работают люди, вследствие ошибочного включения установки.
- Возникновение шагового напряжения на поверхности земли в результате замыкания провода на землю.

Общие требования безопасности к производственному оборудованию

предусмотрены ГОСТ 12.2.003 – 81. В них определены требования к основным элементам конструкций, органам управления и средствам защиты, входящим в конструкцию производственного оборудования любого вида и назначения.

5.3 Психофизиологические особенности поведения человека при его участии в лабораторных работах в данной лаборатории

В психологической оценке труда важное значение придаётся тяжести и напряжённости труда. Для обеспечения условий, способствующих максимальной производительности труда, необходимо учитывать психологические особенности производственных рабочих. Разрабатывать и внедрять мероприятия по созданию благоприятного психологического микроклимата в коллективе, высокой заинтересованности в труде и его результатах, так как при работе на участке рабочие испытывают нервно-психические перегрузки: умственное перенапряжение, эмоциональные перегрузки, перенапряжения анализаторов, монотонность труда и т.д.

Психофизиологическими направлениями повышения производительности труда и снижения утомляемости является: правильное чередование труда и отдыха; рациональная окраска и освещение помещений (зелёные тона); создание благоприятных отношений в коллективе (в чём велика роль руководителя), так как устранение отрицательных эмоций предупреждает развитие заболеваний; создание на участке оптимального микроклимата, то есть устранение запылённости, загазованности, шума и т.д.

5.4 Разработка мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций

Лабораторные аварии, стихийные бедствия опасны своей внезапностью. Однако разрушительные последствия их могут быть предотвращены или

значительно уменьшены, если заранее будут приняты меры.

В целях предупреждения аварий на лабораторных объектах осуществляют комплекс организационных и инженерно-технических мероприятий, определяемых требованиями охраны труда и техники безопасности, противопожарной безопасности и т.д.

На каждом объекте разрабатывается план ликвидации возможных аварий, организована подготовка рабочих и служащих к работе в аварийных условиях, предусмотрен резерв сил и средств, для ликвидации последствий аварии.

Определение категории взрывопожаро опасности рабочего места и обеспеченности необходимыми средствами пожаротушения.

Вероятность возникновения пожаров в зданиях и сооружениях, а также распространение от конструкций и материалов, из которых они выполнены, а также характера исследования.

Мероприятия по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций подразделяются на организационные, технические и эксплуатационные.

В качестве организационных мероприятий на проектируемом участке проводится противопожарный инструктаж рабочих.

При организации участка соблюдены противопожарные правила и санитарные нормы при установке электрооборудования, вентиляции и освещения, что относится к техническим мероприятиям.

К мероприятиям режимного характера относятся: запрещение курения в неустановленных местах, лабораторных помещениях.

В качестве эксплуатационных мероприятий на участке предусмотрены своевременные профилактические осмотры, ремонты и испытания оборудования.

5.5 Обеспечение экологической безопасности и охраны окружающей среды

Охрана воздушного бассейна.

Очистка загрязнённого воздуха и отходящих газов, образуемых при технологических процессах и выбрасываемых в атмосферу, от содержащихся в них вредных твёрдых, жидких и газообразных примесей является основным способом охраны воздушного бассейна от загрязнения.

Охрана водного бассейна.

Охрана водного бассейна заключается в очистке стоков машиностроительного предприятия, для этого применяют механические методы, химические и физико-химические методы, а также комбинированные. Выбор того или иного метода зависит от концентрации взвешенного вещества, степени дисперсности его частиц и требований, предъявляемых к очищенной воде.

Для предварительного удаления крупных загрязнений применяется процеживание стоков через решётки. Для выделения из сточных вод высокодисперсных минеральных примесей и лёгких взвесей обычно применяют отстойники, где они осаждаются или всплывают на поверхность и удаляются. Однако, степень очистки этими методами далека от стопроцентной. Поэтому следующим этапом для очистки сточных вод от лёгких и высокодисперсных взвесей является флотация. Однако даже при самых эффективных режимах флотации остаточное содержание взвешенных веществ составляет $10 \div 15$ мг/л. Поэтому дальнейшим этапом очистки будет фильтрование через слой зернистого или пористого материала. Степень очистки этим способом может достигать в зависимости от режимов фильтрования $97 \div 98$ процентов. Следует также стремиться к переходу на обратное водоснабжение [20].

Охрана почв и утилизация промышленных отходов.

Существует два пути утилизации металлических отходов: с переплавом

и без переплава. В случае утилизации без переплава отпадает необходимость в переработке, но происходит загрязнение почв и растёт площадь свалок, выделяемых для сброса отходов производства.

Заключение по разделу Социальная ответственность

В результате эргономического проектирования дана характеристика объекта исследования, а также выявлены и проанализированы опасные и вредные факторы. В процессе проектирования разработаны методы защиты от всех вероятных вредных и опасных факторов, выявленных ранее. Рассмотрены психофизиологические особенности поведения человека при его участии в производстве работ и даны рекомендации по улучшению его психофизиологического состояния (установление рационального режима труда и отдыха, организация отдыха в процессе работы, соблюдение предельно допустимых норм деятельности, установление переменной нагрузки в соответствии с динамикой работоспособности, чередование различных рабочих операций или форм деятельности в течение рабочего дня, рациональное распределение функций между человеком и техническими устройствами).

Также разработаны мероприятия по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, в том числе по обеспечению экологической безопасности и охраны окружающей среды.

Заключение

В ходе выполнения ВКР была произведена экспериментальная оценка НДС стропильной фермы, сначала без нагрузки, а потом под нагрузкой.

В ферме без приложения нагрузки присутствуют напряжения, оставшиеся после ее изготовления. Знать их уровень необходимо, так как они могут достигать значительного уровня и в некоторых случаях угрожать работоспособности конструкции. Кроме того при наложении внешней нагрузки, напряжения складываются и их уровень существенно вырастает, что может привести к разрушению конструкции.

Для исследования применялся ИН-5101А, который позволяет контролировать внутренние напряжения в конструкции как после ее изготовления, так и во время ее эксплуатации. Такой метод контроля позволяет осуществлять мониторинг внутренних и внешних процессов влияющих на работу конструкции и своевременно осуществлять меры по предупреждению аварийных ситуаций.

Список используемых источников

- 1 Н.Е.Никитина. Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. – 208с.
- 2 Горшков А.С., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н. и др. Волны в сплошных средах. М.:Физматлит, 2004-472с.
- 3 Ионов В.Н., Огибалов П.М Напряжения в телах при импульсивном нагружении.-М.: Высш.шк. 1975
- 4 Алешин Н.П., Углов А.Л. Многофункциональная автоматизированная система спектрально-акустического контроля физико-технических характеристик конструкционных материалов. // Неразрушающий контроль в науке и индустрии 94. Тез. докл. М. 1994. с.72-74
- 5 Щербицкий В.Г., Алешин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений.// 3-е изд. перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана. 2000. 496 с.
- 6 www.info-svarka.ru
- 7 www.osvarke.com
- 8 Алешин Н. П. Возможности методов неразрушающего контроля при оценке напряженно - деформированного состояния нагруженных металлоконструкций.// Сварка и диагностика №6-2011 С.44-47.
- 9 Физический энциклопедический словарь/ Гл. ред. А.М. Прохоров – М.: Сов. Энциклопедия, 1983.-928 с., ил., 2 л.цв.ил.
- 10 Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ.ред. В.В. Клюева – М.: Машиностроение,2004.- 736 с.: ил.
- 11 http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_tech/3598/Тензометрия
- 12 <http://ru.wikipedia.org/wiki>
- 13 http://www.zetms.ru/support/articles/tenzo/tenzo_theory.php
- 14 <http://www.zetms.ru/support/articles/tenzo/tenzo.php>

- 15 <http://www.electronics.ru/journal/article/594>
- 16 www.ptechhnology.ru
- 17 www.ru-patent.info
- 18 www.encotes.ru
- 19 Методы акустического контроля металлов// Под ред. Н.П.Алешина.- М.: Машиностроение. 1989. 456с.
- 20 Гришагин В. М. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие для вузов, изд-во ТПУ, 2010-343с.